

# **Otimização da eficiência térmica de moldes de injeção**

Trabalho de projeto apresentado para a obtenção do grau de Mestre em  
Equipamentos e Sistemas Mecânicos

**Autor**

**Marco António Coelho Sena**

**Orientador**

**Mestre António Manuel de Moraes Grade**

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coorientador**

**Doutor Artur Jorge dos Santos Mateus**

Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto do  
Instituto Politécnico de Leira

“The best way to predict the future is to create it”

*Abraham Lincoln (1809-1865)*

## AGRADECIMENTOS

Não poderia entregar este trabalho sem antes agradecer a todos os que me ajudaram e apoiaram nesta etapa, de forma direta ou indireta.

Ao Professor Doutor Artur Mateus, coorientador do presente trabalho, pelas ideias apresentadas e ajuda na resolução de variados problemas.

Ao Professor António Grade pelo tempo dispensado neste trabalho de projeto.

À Professora Doutora Cândida Malça pela sua disponibilidade em ajudar e pela motivação oferecida.

A todos os meus colegas e amigos do Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto (CDRsp) que tornaram este trabalho possível, principalmente ao Cyril, ao Pedro, ao David e à Elodie, pela ajuda em diversos aspetos e pelo tempo dispensado.

À minha namorada, Diana, pelo apoio ao longo de todos estes anos e pela ajuda oferecida em toda esta etapa.

E finalmente e principalmente, à minha mãe, por todo o apoio durante esta dura etapa, por nunca me deixar desistir e sempre me encorajar, mesmo quando os tempos foram menos bons.

A todos, um grande obrigado!

## RESUMO

A indústria de moldes de injeção para plásticos, é um dos sectores mais sólidos de atividade atualmente a nível nacional, reconhecida pela sua qualidade. No entanto, na agressiva e competitiva economia global dos dias de hoje, a inovação e consequente rapidez de resposta são dos fatores mais importantes de competitividade no mercado atual.

Um molde de injeção é constituído por uma estrutura maciça, pesada e cara de produzir, desperdiçando algum material na sua construção pelo fato de recorrer a processos de fabrico baseados na subtração de material. Aliar a produção de moldes de injeção às novas tecnologias de fabrico aditivo surge como uma alternativa mais rápida e sustentável para a construção destas estruturas. Aproveitando todas as vantagens do fabrico aditivo, é possível ainda otimizar as topologias internas das estruturas maciças, transformando-as em conjuntos alveolares otimizados para a solicitação estrutural e térmica desejada, reduzindo drasticamente o peso total da estrutura e diminuindo a quantidade de material necessária para a produção.

De forma a estudar esta possibilidade, dois tipos de provetes foram criados, com recurso à tecnologia Selective Laser Melting (SLM), com dois tipos de geometrias internas distintas, representando dois excertos de uma estrutura de um molde.

As topologias internas possuem como objetivo principal, criar um elevado grau de porosidade interna e, ainda assim obter, em relação a componentes maciços, resultados satisfatórios no que compete ao comportamento mecânico e térmico. O comportamento mecânico e térmico de cada geometria foi avaliado numericamente através da utilização de ferramentas de Computer Aided Engineering (CAE). Posteriormente os provetes produzidos foram avaliados experimentalmente através de ensaios de compressão e ensaios térmicos.

Os resultados mostraram que a topologia interna de face hexagonal oferece uma resistência mecânica superior à topologia cuboctaédrica, enquanto na análise térmica o provete geometria cuboctaédrica apresenta melhores resultados.

**Palavras-chave:** Fabrico aditivo; *Selective Laser Melting*; Topologias Internas; Otimização; Moldes de injeção; Refrigeração conformável;

## ABSTRACT

The plastic injection moulding industry is currently one of strongest national industries, known for their good quality products. However, in the aggressive global economy that exists today, innovation and consequent time to market are the most important factors of competitiveness.

An injection mold consists of a solid, heavy and expensive to produce structure, that some material in its construction due to the use of material subtraction processes. Combining the production of injection molds with the advances of additive manufacturing technologies emerges as a quicker and sustainable alternative to the construction of these structures. Taking full advantage of additive manufacturing, it is still possible to optimize the internal topologies of these massive structures, turning them into optimized alveolar structures, for the desired structural and thermal stress solicitations. Doing this results in a dramatically reduction of the structure overall weight and decreases the amount of material required for production.

To study this possibility, two types of test bodies were created, using Selective Laser melting (SLM) technology with two different types of internal geometry, representing two parts of the mould structure.

The internal topologies have the main objective to creation a high degree of internal porosity and still get satisfactory results in thermal and mechanical behavior when compared to dense structures. The mechanical and thermal behaviors of each geometry were evaluated numerically by using Computer Aided Engineering (CAE) tools. Subsequently the samples produced were evaluated experimentally through compression and thermal tests.

The results showed that the hexagonal face internal topology provides a higher mechanical strength when compared to the cuboctahedral structure, while the thermal analysis shows that the sample with cuboctahedral geometry produce better results.

**Keywords:** Additive manufacturing; Selective Laser Melting; Internal topologies; Optimization; Injection molding; Conformal cooling;

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>iii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>SIMBOLOGIA .....</b>	<b>xi</b>
<b>ABREVIATURAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Organização da dissertação .....	2
<b>2. MOLDES DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS .....</b>	<b>4</b>
2.1. Fases do ciclo .....	4
2.2. Molde.....	6
2.3. Refrigeração do molde.....	7
2.4. Tipo de canais de refrigeração.....	8
2.5. Utilização de sistemas CAE no apoio do projeto do molde .....	10
<b>3. FABRICO ADITIVO .....</b>	<b>12</b>
3.1. Tipos de tecnologia.....	12
3.2. Princípio de funcionamento.....	13
3.3. Vantagens e Desvantagens do FA .....	15
3.3.1. Liberdade de geometria .....	15
3.4. Fabrico aditivo de componentes metálicos.....	16
3.4.1. Fusão de camada de pó.....	17
3.4.2. Jato de ligante - 3DP.....	18
3.4.3. Fusão por feixe de eletrões – EBM .....	19
3.4.4. Sinterização Seletiva por Laser – SLS .....	20
3.4.5. Sinterização direta de metais por laser – DMLS .....	21
3.4.6. Fusão seletiva a laser - SLM.....	22
3.5. Fabrico aditivo de moldes .....	25
3.6. Topologias internas .....	27
<b>4. DESENVOLVIMENTO DE TOPOLOGIAS INTERNAS .....</b>	<b>29</b>
<b>5. ESTUDO NUMÉRICO .....</b>	<b>32</b>

5.1.	SolidWorks Simulation .....	32
5.2.	Parâmetros da malha.....	33
5.3.	Estudo estrutural .....	34
5.3.1.	Provete cuboctaedro .....	35
5.3.2.	Provete de face hexagonal .....	37
5.4.	Estudo de comportamento térmico .....	39
5.4.1.	Provete cuboctaedro .....	40
5.4.2.	Provete de face hexagonal .....	42
<b>6.</b>	<b>ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>45</b>
6.1.	Produção dos provetes .....	45
6.1.1.	Descrição do material utilizado .....	47
6.1.2.	Parâmetros de processamento.....	50
6.2.	Ensaio de compressão .....	51
6.2.1.	Descrição do equipamento.....	51
6.2.2.	Provete cuboctaedro .....	52
6.2.3.	Provete de face hexagonal .....	53
6.3.	Ensaio térmico .....	55
6.3.1.	Descrição do equipamento.....	56
6.3.2.	Provete cuboctaedro .....	57
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>62</b>
7.1.	Conclusões.....	62
7.2.	Trabalhos futuros .....	63
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ciclo de Moldação (Centimfe, 2003) .....	5
Figura 2.2 - Estrutura de um molde (Kazmer, 2007).....	6
Figura 2.3 - Tempos do ciclo de injeção (Shoemaker 2006).....	7
Figura 2.4 - Refrigeração correta versus refrigeração incorreta (Shoemaker, 2006) .....	8
Figura 2.5 - Canais paralelos (Park & Dang, 2005) .....	8
Figura 2.6 - Canais em série (Park & Dang 2005) .....	9
Figura 2.7 - Canais convencionais e canais conformáveis, respetivamente (Park & Dang, 2005).....	9
Figura 2.8 - Molde fabricado por DMLS com canais de refrigeração conformáveis (Mayer, 2005).....	10
Figura 2.9 - Projeto do molde (Park & Dang 2005) .....	10
Figura 3.1 – Princípio de funcionamento do FA (Gibson <i>et al.</i> 2010).....	13
Figura 3.2 – Modelo sólido, formato STL e separação por camadas, respetivamente (web)...	14
Figura 3.3 – “Efeito Escada” (Pan <i>et al.</i> 2012) .....	15
Figura 3.4 – Processos de FA de componentes metálicos.....	17
Figura 3.5 – Diferentes processos inerentes à tecnologia de fusão de camada de pós (Karunakaran <i>et al.</i> 2013).....	17
Figura 3.6 – Princípio de funcionamento de 3DP (Turker <i>et al.</i> 2008).....	18
Figura 3.7 – Esquema de processo EBM (Jamshidinia <i>et al.</i> 2014).....	19
Figura 3.8 – Mecanismo de SLS (Nelson <i>et al.</i> 1993) .....	20
Figura 3.9 – Esquema do processo DMLS da EOS (Simchi <i>et al.</i> 2003).....	21
Figura 3.10 – Esquema de funcionamento do processo SLM (Gu <i>et al.</i> 2014).....	22
Figura 3.11 – Comportamento do laser ao longo do processamento na camada.....	23
Figura 3.12 - Modelo CAD de molde com canais de refrigeração conformáveis e respetiva peça fabricada através de DMLS (Shellabear & Weilhammer, 2007) .....	25
Figura 3.13 - Postiço fabricado pelo equipamento EOSINT M270 (Shellabear & Weilhammer, 2007).....	26
Figura 3.14 - Equipamento PolyJet (Zonder & Sella, 2013).....	26
Figura 3.15 - Molde de injeção em ABS fabricado por um equipamento PolyJet (Zonder & Sella 2013).....	27
Figura 3.16 – Criação de estruturas internas (Liulan <i>et al.</i> 2007) .....	28
Figura 3.17 – Conectividade entre microestruturas (Liulan <i>et al.</i> 2007).....	28
Figura 4.1 – Modelo unidade cuboctaédrica, vista isométrica e frontal, respetivamente.....	29
Figura 4.2 – Modelo unidade de face hexagonal, vista isométrica e frontal, respetivamente. .	30
Figura 4.3 – Modelo provete concebido com estrutura cuboctaédrica e hexagonal, respetivamente. ....	30
Figura 4.4 – Detalhe da estrutura dos provetes. ....	31
Figura 5.1 – Modelo virtual sólido e malha sólida do modelo, respetivamente (Solidworks, 2011).....	32

Figura 5.2 – Elemento linear e elemento parabólico, respetivamente (Solidworks, 2011) .....	33
Figura 5.3 – Comparação de elemento com AR de valor 1 e elemento com AR de valor 14, respetivamente (Burkhart <i>et al.</i> 2013) .....	34
Figura 5.4 – Malha obtida para o provete cuboctaedro .....	36
Figura 5.5 – Tensões aplicadas durante o ensaio para o provete cuboctaedro .....	36
Figura 5.6 – Detalhe da tensão máxima aplicada .....	37
Figura 5.7 - Malha obtida para o provete de face hexagonal .....	38
Figura 5.8 – Tensões aplicadas durante o ensaio para o provete de face hexagonal .....	39
Figura 5.9 – Distribuição temperatura no provete cuboctaedro passados 15s de estudo .....	40
Figura 5.10 – Distribuição temperatura no provete cuboctaedro passados 45s de estudo .....	41
Figura 5.11 – Tempo em que o topo do provete cuboctaedro atinge a temperatura de 90°C... ..	41
Figura 5.12 – Distribuição temperatura no provete de face hexagonal passados 15s de estudo .....	42
Figura 5.13 – Distribuição temperatura no provete de face hexagonal passados 45s de estudo .....	43
Figura 5.14 – Tempo em que o topo de provete de face hexagonal atinge a temperatura de 90°C. ....	44
Figura 6.1 – SLM 125 HL (CDRSP, 2014) .....	45
Figura 6.2 – Produção dos provetes no equipamento .....	46
Figura 6.3 – Provete de face hexagonal produzido através de SLM .....	47
Figura 6.4 – Provete cuboctaedro produzido através de SLM .....	47
Figura 6.5 – Pó para processamento de aço H13 (CDRSP, 2014) .....	48
Figura 6.6 – Diagrama temperatura-tempo-transformação do aço H13 .....	48
Figura 6.7 – Instron 4505 (CDRSP, 2014) .....	52
Figura 6.8 – Preparação para o ensaio de compressão da geometria cuboctaédrica .....	52
Figura 6.9 – Provete cuboctaédro após ensaio de compressão .....	53
Figura 6.10 – Curva Carga vs Deslocamento do provete cuboctaedro .....	53
Figura 6.11 - Preparação para o ensaio de compressão da geometria de face hexagonal .....	54
Figura 6.12 – Provete de face hexagonal após ensaio de compressão .....	54
Figura 6.13 - Curva Carga vs Deslocamento do provete de face hexagonal .....	55
Figura 6.14 – Câmara termográfica Flir T650sc (CDRSP, 2014) .....	57
Figura 6.15 – Ensaio térmico (CDRSP, 2014) .....	57
Figura 6.16 – Provete cuboctaedro, 15 segundos de ensaio .....	58
Figura 6.17 – Provete cuboctaedro, 45 segundos de ensaio .....	59
Figura 6.18 – Provete de face hexagonal, 15 segundos de ensaio .....	59
Figura 6.19 – Provete de face hexagonal, 45 segundos de ensaio .....	60

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Alguns equipamentos que trabalham com a técnica de SLM (Riemer et al. 2014; Sun et al. 2013; Yadroitsev et al. 2010; Ziółkowski et al. 2014; Li et al. 2014; Dadbakhsh et al. 2012; Louvis et al. 2011) .....	24
Tabela 5.1 - Detalhes da malha do provete de face hexagonal.....	38
Tabela 6.1 – Características técnicas do equipamento SLM 125HL.....	46
Tabela 6.2 – Propriedades mecânicas do aço H13 .....	49
Tabela 6.3 – Propriedade térmicas do aço H13 .....	49
Tabela 6.4 – Composição química do aço H13 .....	50
Tabela 6.5 – Parâmetros de construção dos provetes de teste .....	50
Tabela 6.6 – Características técnicas da câmara termográfica Flir T650sc.....	56
Tabela 6.7 – Valores de temperatura aos 15 segundos de ensaio do provete cuboctaedro .....	58
Tabela 6.8 - Valores de temperatura aos 45 segundos de ensaio do provete cuboctaedro .....	59
Tabela 6.9 - Valores de temperatura aos 15 segundos de ensaio do provete de face hexagonal .....	60
Tabela 6.10 - Valores de temperatura aos 45 segundos de ensaio do provete de face hexagonal .....	61



## SIMBOLOGIA

°C – Graus Celsius

F – Força [N]

A – Área [mm<sup>2</sup>]

$\sigma_{\text{máx}}$  – Tensão máxima [MPa]

RC - Dureza Rockwell

## ABREVIATURAS

3D - Tridimensionais

3DP – *Tridimensional Printing*

AISI - *American Iron and Steel Institute*

AR – *Aspect Ratio*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CAD - *Computer Aided Design*

CAE - *Computer Aided Engineering*

CDRSP – Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto

CNC - *Computacional Numerical Control*

DIN - *Deutsches Institut für Normung* (Instituto Alemão para Normatização)

DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*

EBM – *Electron Beam Melting*

FA – Fabrico Aditivo

FDM - *Fused Deposition Modeling*

ISO - *International Standard Organization*

LOM – *Laminated Object Manufacturing*

MEF – Método dos Elementos Finitos

SLM - *Selective Laser Melting*

SLS – *Selective Laser Sintering*

STL - *Standard Template Library*

UNS - *Unified Numbering System*

UV - Ultra violeta

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a tecnologia de moldação por injeção de materiais poliméricos tem uma elevada importância a nível comercial por permitir obter peças com alto rigor dimensional com elevadas taxas de produção. O consumidor está cada vez mais exigente quanto à qualidade dos produtos que adquire. Para garantir a qualidade dimensional e estrutural das peças produzidas, certas condições devem ser cumpridas:

- O molde deve apresentar uma estrutura muito rígida;
- A guia que alinha a cavidade com a bucha deve ser perfeita;
- A alimentação, que permite o percurso do material fundido desde o bico da injetora até à cavidade, deve ser constante;
- A temperatura do molde deve ser uniforme na zona moldante para garantir que o arrefecimento seja rápido e eficiente;
- A extração das peças do molde, quando prontas, deve ser feita de modo que elas não sejam danificadas.

A necessidade de produzir mais peças, com elevada qualidade, num curto período de tempo, com um custo mais baixo, proporcionou ao desenvolvimento de um sistema de injeção otimizado.

O controlo de temperatura do molde durante processo de injeção é um fator determinante para a obtenção de peças com um bom acabamento e rigor dimensional. Este controlo é também fulcral para a diminuição do tempo de arrefecimento da peça para que esta possa ser extraída o mais rapidamente possível. A otimização do processo de refrigeração do molde pode, indubitavelmente, conduzir a uma diminuição do tempo total útil do processo de injeção, permitindo um tempo de fabrico mais curto o que conduz a uma diminuição de custos de produção.

Para além deste aspeto crítico, existe ainda a questão do peso de uma estrutura de um molde. Este tipo de estruturas é geralmente construída através de processos convencionais de produção, partindo de um bloco de aço e subtraindo material até atingir a forma desejada. Este processo estagnou há vários anos na indústria dos moldes, sendo utilizado como regra geral desde então. No entanto, isto conduz a custos bastante elevados de produção da ferramenta, na medida em que se torna um processo de produção lento e que necessita de mão-de-obra qualificada em todas as fases do mesmo. Após terminado o molde apresenta-se com uma estrutura maciça e pesada, difícil de transportar e de colocar nos equipamentos de injeção. A utilização de estruturas alveolares internas, construídas através de processos de fabrico aditivo, poderá vir a otimizar o peso destas estruturas e tornar um molde num produto mais sustentável, na medida em que o material utilizado para construir o bloco com uma determinada resistência mecânica é totalmente aproveitado, ao contrário da produção de moldes maciços por processos convencionais, em que o material em excesso é subtraído e não aproveitado. Desta forma, este tipo de tecnologia pode-se tornar bastante atrativa para a

produção de moldes, na medida em que utiliza menos material e permite uma produção mais rápida, diminuindo assim os custos de produção.

### **1.1. Objetivos**

O propósito do presente projeto consiste no estudo de uma estrutura de um molde possuindo uma estrutura interna otimizada, de forma a conseguir suportar as pressões de injeção e ao mesmo tempo, aumentar a eficiência térmica da mesma, conduzindo assim a um melhor acabamento da peça. Esta estrutura otimizada terá como inovação zonas moldantes alveolares com canais conformáveis de refrigeração configurados/adaptados às peças a produzir. Com o auxílio das tecnologias de fabrico aditivo, neste caso o SLM, pretendem-se produzir as topologias internas, sendo estas peças complexas e impossíveis de serem fabricadas por outro tipo de tecnologia convencional.

Os objetivos deste projeto prendem-se fundamentalmente com:

- Conceção dos modelos CAD 3D de excertos de um molde;
- Simulação e estudo térmico e estrutural das estruturas internas;
- Fabrico das estruturas alveolares;
- Recolha de dados experimentais ;
- Comparação e discussão de resultados

Em suma, pretende-se otimizar uma estrutura interna para um molde, produzida com recurso a tecnologias de fabrico aditivo, permitindo uma otimização em termos de peso e quantidade de material na produção do molde, bem como uma otimização do comportamento térmico da estrutura, de forma a conduzir à produção de melhor qualidade.

### **1.2. Organização da dissertação**

A dissertação pode ser vista como tendo duas partes principais que se dividem ao longo de 8 capítulos no total.

A primeira parte engloba o capítulo 1 ao capítulo 3, inclusive. Nestes capítulos é feita uma introdução teórica ao trabalho e às tecnologias que o mesmo aborda, passando pelos moldes de injeção para plásticos no capítulo 2 e descrevendo variadas tecnologias de fabrico aditivo, no capítulo 3. Na descrição de tecnologias de fabrico aditivo, a atenção encontra-se focada nas tecnologias fabrico aditivo de peças metálicas através da fusão de camada de pós, pelo facto da tecnologia utilizada no âmbito deste projeto se encontrar nessa categoria. Também no capítulo 3 é efetuada uma introdução ao desenvolvimento de topologias internas.

A segunda parte desta dissertação, apresenta o testes e resultados deste projeto, desde a modelação das estruturas internas a utilizar, capítulo 4, à descrição dos testes efetuados e resultados obtidos nos ensaios numéricos e experimentais, capítulo 5 e 6, respetivamente. O



trabalho termina com a explicação das conclusões retiradas no âmbito do mesmo e com uma proposta de trabalhos futuros, no capítulo 7.

## 2. MOLDES DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

O conjunto de operações que se mostram na Figura 2.1, representam um processo global designado de ciclo de moldação (Centimfe, 2003). Este processo engloba todas as etapas de produção de uma peça plástica. O funcionamento do ciclo é praticamente independente da máquina de injeção, podendo ser utilizado para descrever todos os processos de injeção. O ciclo deve ser feito, preferencialmente, em modo automático para que seja o mais breve possível (Carreira, 2013).

O ciclo pode ser efetuado de três modos distintos:

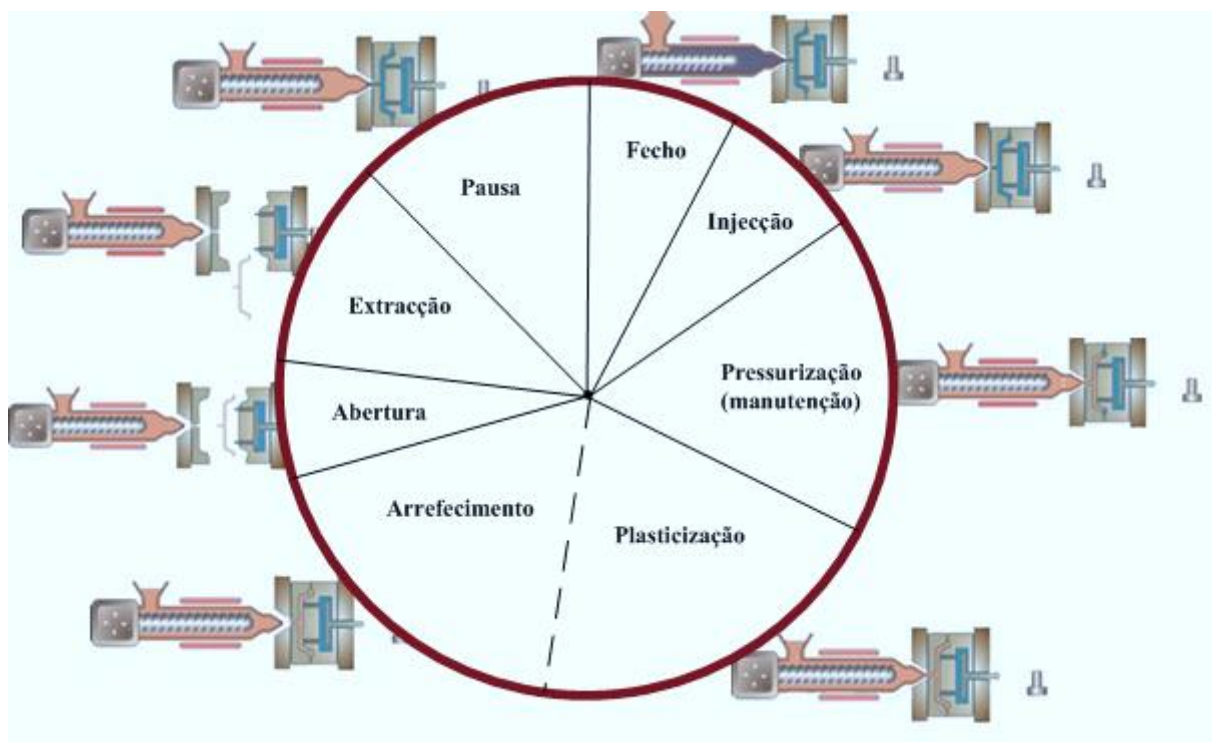
- **Manual:** Composto por uma sequência de operações morosas efetuadas manualmente pelo operador. Este modo é geralmente utilizado quando se está a afinar o processo e a controlar os parâmetros de máquina. Os tempos de pausa neste modo são muito frequentes.
- **Semiautomático:** Todo o processo decorre de modo automático, no entanto necessita de ordem do operador para iniciar um novo ciclo. É utilizado quando a extração da peça não se consegue fazer de forma automática, ou quando há a necessidade de intervenção no molde a cada ciclo. Normalmente utilizado em máquinas que não estão a produzir em série ou em máquinas utilizadas para testar moldes novos em que a intervenção do operador é constante. Neste modo verificam-se alguns tempos de pausa.
- **Automático:** A sequência de operações não necessita da intervenção do operador, tornando o processo totalmente autónomo. É o modo onde se consegue uma maior produtividade e o tempo de pausa é igual a zero.

### 2.1. Fases do ciclo

- **Fecho do Molde** – o ciclo inicia-se com o fecho do molde. Nesta fase as duas principais partes constituintes de um molde de injeção (Lado da Injeção e Lado da Extração) são prensadas entre os pratos da máquina injetora. É garantido assim um contacto total entre as superfícies da junta do molde, promovendo a boa qualidade da peça injetada. Esta fase deve ser executada no menor tempo possível, estando a velocidade de execução limitada às características da máquina e dimensão do molde.
- **Fase de Injeção** – através do avanço linear do fuso é efetuada a injeção do material fluido para o interior do molde. A velocidade da injeção, deve ser moderada para atingir um compromisso entre a qualidade da peça e o tempo de enchimento. Velocidades muito elevadas conduzem a baixos tempos de enchimento total da peça, no entanto podem causar defeitos na mesma.
- **Fase de Pressurização** – também denominada de segunda pressão ou pós pressão. Esta fase inicia-se após o enchimento da peça. A pressurização do material após o

enchimento reduz o efeito de contração por arrefecimento, contribuindo para a diminuição de empenos da peça final, e evita o refluxo do material fundido. Porém, o excesso de pressurização pode ser prejudicial, criando tensões internas na peça e dificultando a sua extração. Esta fase termina quando o fundido nos canais solidifica, impedindo o fluxo de material.

- **Fase de Arrefecimento e Plasticização** – de todas as fases do ciclo, a fase de arrefecimento é das que mais impacto tem no mesmo. Nesta fase ocorrem dois processos simultâneos muito importantes para o ciclo de moldação. Após a solidificação do canal de injeção o fuso da máquina roda e inicia-se a plasticização do material para o novo ciclo. O movimento de rotação obriga o material a fluir para a frente do fuso e este recua axialmente, devido à pressão, deixando um aglomerado de fundido junto ao injetor a que se dá o nome de almofada. Simultaneamente ocorre o arrefecimento do fundido. Este processo energético consiste na permuta de calor, através do material do molde, entre o fundido e o sistema de refrigeração. O tempo de arrefecimento depende principalmente da eficácia do sistema de refrigeração e da geometria e espessura da peça plástica. A gestão deste tempo é crucial para a qualidade final da peça. Elevadas velocidades de refrigeração podem causar empenos na peça, enquanto velocidades mais baixas aumentam o tempo de ciclo, aumentando assim o tempo total de ciclo. A fase de arrefecimento termina assim que o fundido adquira consistência suficiente para que possa ser extraído eficazmente e sem danificar a peça final.

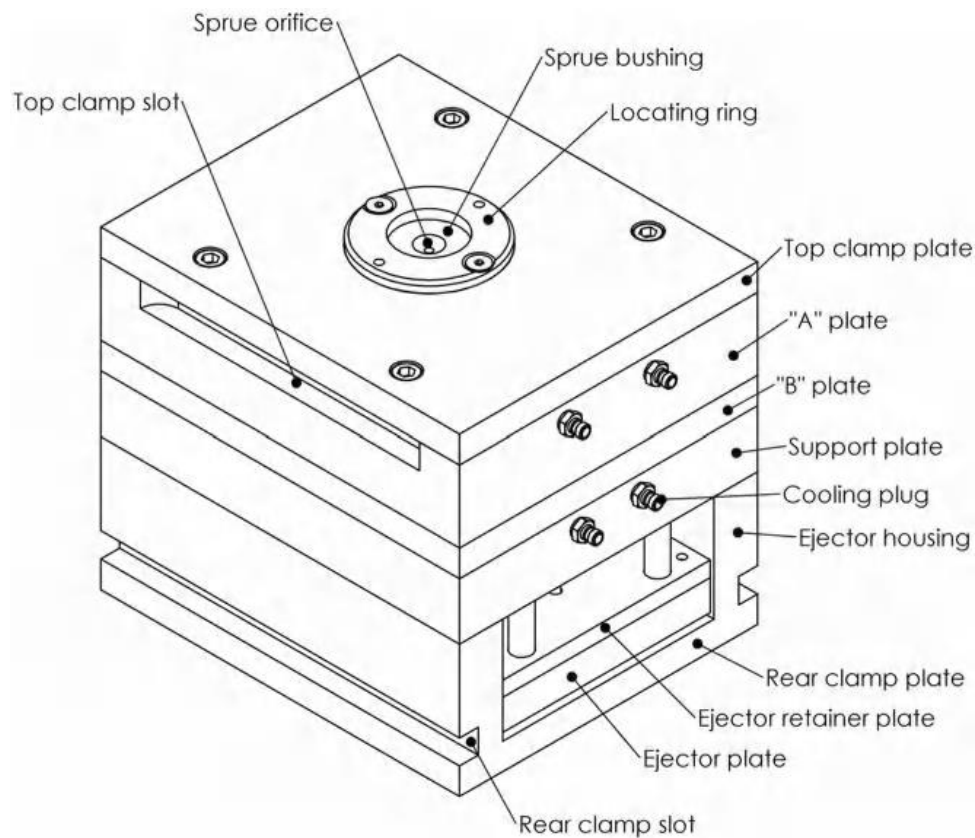


**Figura 2.1** - Ciclo de Moldação (Centimfe, 2003)

- **Fase de Abertura e Extração** – geralmente, a abertura do molde é feita em duas metades, o lado da injeção e o lado da extração. Desta forma, a peça injetada fica exposta e pronta para ser extraída. De seguida, as chapas extratoras avançam empurrando a peça através de extratores. O produto final normalmente cai por gravidade ou é retirado por um robot. Após a extração da peça, as chapas extratoras recuam e o molde volta a fechar. O tempo consumido por estas fases depende principalmente das características da máquina injetora, mas também da complexidade do molde e do método de injeção da peça.
- **Tempo de Pausa** – é o período após extração da peça e antes do fecho do molde. O seu valor deve ser igual a zero, o que acontece normalmente quando o processo é automático. No entanto, este valor altera-se quando a remoção da peça é feita de modo manual, ou quando o molde necessita algum tipo de operação adicional antes do início do novo ciclo.

## 2.2. Molde

Um molde de injeção é uma ferramenta que permite a produção de peças numa máquina de injeção. Podem variar em tamanho, tipo, ou grau de complexidade, dependendo do modelo da peça a produzir. Na sua forma mais simples, como apresentado na Figura 2.2., um molde é constituído por duas metades ajustáveis, que definem uma ou várias impressões com o modelo que se pretende fabricar.



**Figura 2.2** - Estrutura de um molde (Kazmer, 2007)

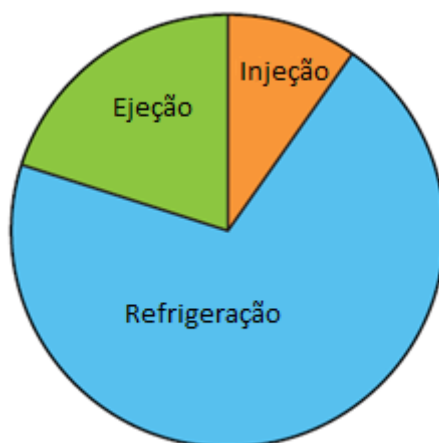
A principal função do molde é dar forma ao material injetado, no entanto o mesmo é responsável por outras tarefas fundamentais tais como, a alimentação da matéria-prima desde o bico de injeção até à impressão, a vedação do material durante o tempo necessário, o arrefecimento da moldação e a sua extração. O molde deve ainda garantir a reprodutibilidade dimensional de ciclo para ciclo. A qualidade superficial do molde é determinante no acabamento superficial da peça moldada.

Tipo de material plástico a injetar, número de peças a produzir e aspetos funcionais e estéticos da peça, são alguns dos principais aspetos económicos e tecnológicos que influenciam a complexidade do projeto de um molde.

De uma maneira geral, o projeto mecânico do molde é encarado com grande cuidado, desde o desenho rigoroso dos seus componentes à seleção dos materiais e à definição de tolerâncias e ajustes. (Kazmer, 2007)

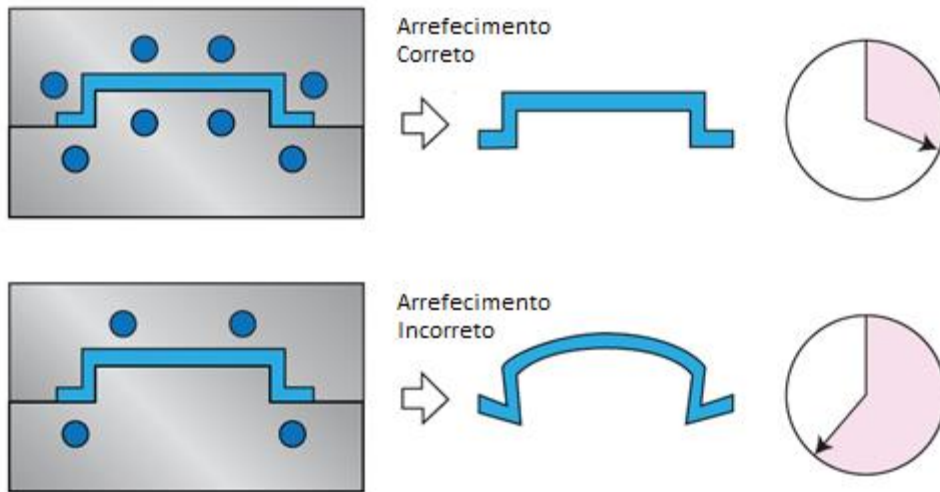
### 2.3. Refrigeração do molde

O processo de arrefecimento do molde é um dos mais importantes no ciclo de moldação, pois engloba normalmente mais de metade do tempo total do ciclo e afeta diretamente a qualidade final da peça bem como a taxa de produção da mesma. Desta forma, o *design* de um bom sistema de canais de arrefecimento do molde é uma parte crucial do seu projeto. (Saifullah *et al*, 2009)



**Figura 2.3** - Tempos do ciclo de injeção (Shoemaker 2006)

Um circuito de refrigeração eficiente reduz o tempo de arrefecimento, conduzindo a um aumento na produtividade. Para além disso, um arrefecimento uniforme do molde, traduz-se numa produção de peças de qualidade superior, mantendo precisão dimensional, estabilidade e reduzindo empenos.



**Figura 2.4** - Refrigeração correta versus refrigeração incorreta (Shoemaker, 2006)

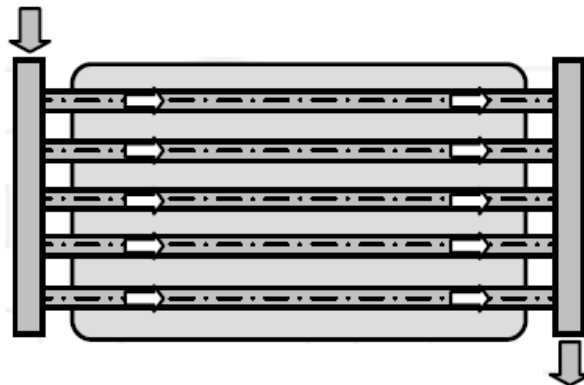
O próprio molde pode ser visto como um permutador de calor, em que o calor pertencente ao material injetado é absorvido por um fluido frio, normalmente água.

## 2.4. Tipo de canais de refrigeração

### 2.4.1. Convencionais

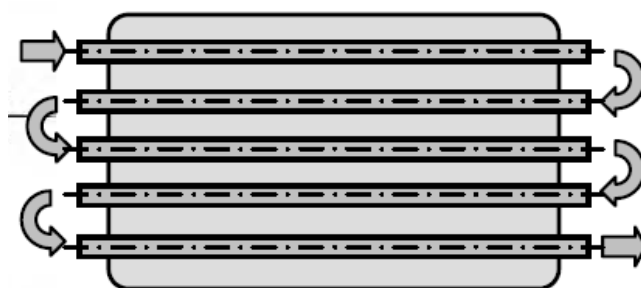
São compostos por um conjunto de perfurações retilíneas efetuadas no molde. Podem ser dispostas por canais paralelos ou em série.

Os canais paralelos são canais perfurados em que o fluido de arrefecimento flui a partir de um coletor de fornecimento até um coletor de recolha conforme mostrado na Figura 2.5. Devido às características de fluxo dos canais de arrefecimento paralelos, o caudal ao longo dos vários canais pode ser diferente, dependendo da resistência ao fluxo em cada um dos canais. Esta variação, por sua vez, faz com que a eficiência da transferência térmica dos canais de arrefecimento variem de um para outro. Como resultado, o arrefecimento do molde pode não ser uniforme com este tipo de configuração.



**Figura 2.5** - Canais paralelos (Park & Dang, 2005)

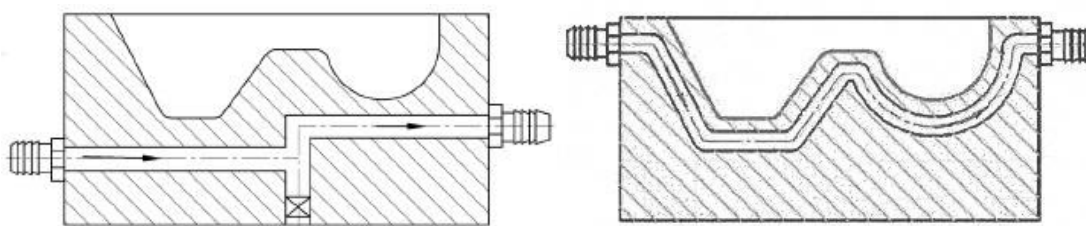
Os canais de refrigeração que se encontram conectados por apenas um caminho, são os chamados canais em série, em que o fluido de arrefecimento percorre o circuito todo a partir de uma alimentação até uma saída, como demonstrado na Figura 2.6. Este tipo de canal de refrigeração convencional é o mais utilizado na prática. Se os canais forem uniformes nas suas dimensões, é possível garantir que o fluido mantém o seu caudal em regime turbulento ao longo de todo o seu comprimento. Esse fluxo turbulento permite uma maior transferência de calor, tornando o comportamento térmico mais eficaz. Em moldes de grandes dimensões, mais que um canal em série pode ser utilizado, de forma a manter uma temperatura uniforme no molde.



**Figura 2.6** - Canais em série (Park & Dang 2005)

#### 2.4.2. Conformáveis

Ao contrário dos canais de refrigeração convencionais que são perfurados a direito no molde, os canais de refrigeração conformáveis tendem a seguir a forma da peça a produzir, oferecendo uma melhor distribuição de temperatura pelo molde. Na Figura 2.7 pode-se observar a diferença entre os caminhos de refrigeração convencionais e conformáveis.



**Figura 2.7** - Canais convencionais e canais conformáveis, respetivamente (Park & Dang, 2005)

A produção de moldes aliada ao avanço das tecnologias de fabrico aditivo, permite-nos fabricar os mesmos otimizando os canais de refrigeração conformáveis para qualquer geometria, por mais complexa que a peça possa ser. A figura 2.8 demonstra um exemplo de um molde fabricado com recurso a DMLS. É reportado que este tipo de refrigeração assegura qualidade do produto e ainda aumenta a produtividade em 20%. (Mayer, 2005)



**Figura 2.8** - Molde fabricado por DMLS com canais de refrigeração conformáveis (Mayer, 2005)

## 2.5. Utilização de sistemas CAE no apoio do projeto do molde

O projeto de desenvolvimento de um molde, é um processo que pode ser dividido por quatro etapas (Park & Dang, 2005). Na primeira fase é efetuado o modelo da peça a produzir e do molde para a respetiva peça. De seguida, os modelos são testados e aperfeiçoados com recurso a sistemas CAE, de forma a conseguir otimizar a produção e qualidade dos mesmos. Terminado esse processo, procede-se então à fabricação do molde e consequentemente à produção de peças por injeção.



**Figura 2.9** - Projeto do molde (Park & Dang 2005)

### 2.5.1. Simulação do processo de injeção

A utilização dos sistemas CAE para simulação do processo de moldação por injeção, como apoio ao projeto de artigos e moldes é consideravelmente vantajoso na aceleração do tempo de desenvolvimento dos mesmos.

O *Moldflow Insight*, é uma das ferramentas computacionais de simulação de fluxo mais utilizada hoje em dia para este tipo de aplicações. Esta ferramenta utiliza o método dos elementos finitos para a solução numérica das equações que descrevem o fluxo polimérico do



fundido.

A realização de uma simulação deve seguir um procedimento adequado, que compreende a correta definição dos dados iniciais e dos parâmetros de saída dos resultados.

### **Dados Iniciais** (Shen *et al*, 2008; Wan Abdul Rahman *et al*, 2008)

Para a realização de análises CAE é necessário reunir um determinado número de pré-requisitos iniciais, indispensáveis para o estudo. Para tal são necessários, os seguintes dados iniciais:

- Informação geométrica ou modelo CAD 3D, que reúne informações relevantes tais como o volume de injeção, a extensão de fluxo, variação de espessura da moldação ao longo do fluxo;
- Material de moldação, estabelecendo as condições reológicas e térmicas do fluxo de fundido;
- Material do molde, que estabelece as condições para a determinação do balanço térmico entre o fundido e o molde.

### **Informação de saída** (Shen *et al*, 2008; Wan Abdul Rahman *et al*, 2008)

A utilização de ferramentas de CAE no projeto de peças e moldes, deverá permitir a melhoria do projeto, quer de peças, quer do molde, pela possibilidade de previsão do comportamento.

É assim importante estabelecer quais são os parâmetros iniciais necessários para a realização da simulação. De igual modo, é também relevante a identificação das variáveis cujos valores se pretendem determinar.

Alguns dos possíveis dados de saída são:

- Força de fecho;
- Pressão de injeção;
- Pressão de manutenção;
- Perfil do caudal de injeção ótimo;
- Temperatura das águas;
- Tempo de manutenção;
- Tempo de arrefecimento.

### 3. FABRICO ADITIVO

Resumidamente, Prototipagem Rápida (designação pela qual as tecnologias de fabrico aditivo foram inicialmente conhecidas) pode ser definida como o fabrico de uma determinada peça física tridimensional, gerada diretamente por um *software* CAD, através de sobreposições de camadas de material. Este processo fornece a capacidade de imprimir literalmente as suas ideias em 3D, permitindo a produção de protótipos e modelos de forma rápida e económica quando comparada com as formas convencionais de produção. (Cooper, 2001)

Com o passar dos anos, os utilizadores de tecnologias de prototipagem rápida chegaram à conclusão que este termo não descrevia efetivamente as mais recentes aplicações da mesma. Com este avanço, tornou-se possível produzir diretamente peças finais nas máquinas, tornando o termo “protótipo” errado. Este tipo de designação também passa por cima do princípio básico deste tipo de tecnologias que utilizam uma abordagem aditiva de fabrico. Foi decidido então adotar o termo Fabrico Aditivo para designar este tipo de tecnologia. (Gibson *et al*, 2010)

O Fabrico Aditivo mostrou-se pela primeira vez em 1987, quando a empresa 3D Systems desenvolveu um processo que permite a obtenção por sobreposição de camadas poliméricas de um modelo tridimensional, efetuando a polimerização do material a ser utilizado por ação de luz ultravioleta. Este processo, ainda hoje bastante utilizado, denomina-se Estereolitografia (Wohlers 2014).

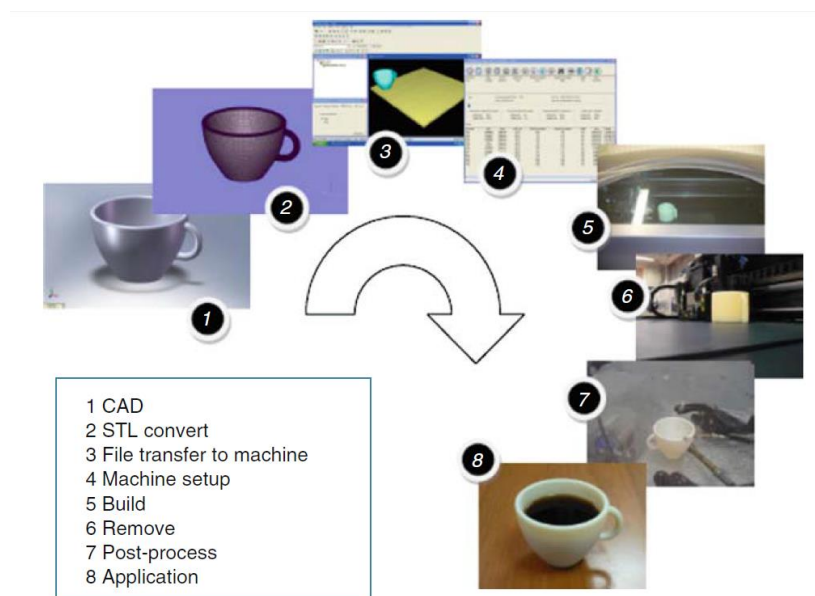
#### 3.1. Tipos de tecnologia

Os processos de FA atualmente mais importantes podem se agrupados pelo estado ou forma inicial da matéria-prima utilizada para fabricação (Chua *et al*. 2010). Desta forma, os mesmos podem ser classificados como processos baseados em líquido, sólido e pó. Sendo assim tem-se (Volpato, 2007):

- **Baseados em líquido:** A matéria-prima, utilizada para o fabrico da peça, encontra-se no estado líquido antes de ser processada. Esta categoria engloba as tecnologias que envolvem a polimerização de uma resina líquida com recurso a um laser UV (ex. Estereolitografia).
- **Baseados em sólido:** Nestes processos, a matéria-prima encontra-se no estado sólido, podendo estar na forma de filamento, lâmina, ou outra qualquer. Alguns dos processos fundem o material antes da sua deposição (ex, Modelagem por fusão e deposição, FDM). Outros apenas recortam uma lâmina do material adicionado (LOM)
- **Baseados em pó:** A matéria-prima está na forma de pó antes do processamento. Para o seu processamento, pode ser utilizado laser (SLS, EOSINT) ou um aglutinante aplicado por um cabeçote tipo jato de tinta (3DP)

### 3.2. Princípio de funcionamento

A figura ilustra o princípio de geração de um modelo por FA:



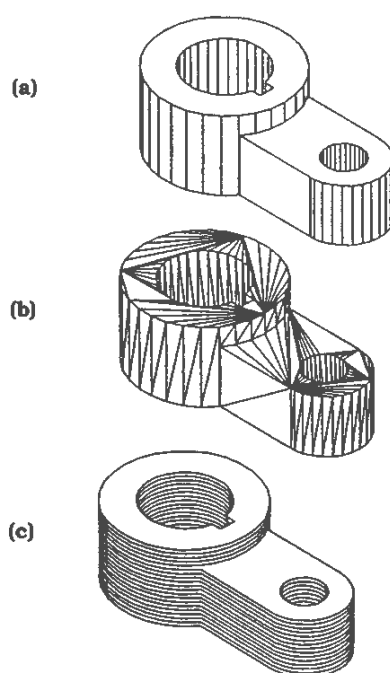
**Figura 3.1** – Princípio de funcionamento do FA (Gibson *et al.* 2010)

O processo de fabrico aditivo envolve um número de etapas que vão desde o modelo virtual CAD até à peça física produzida. No entanto, diferentes produtos envolvem diferentes etapas e diferentes tempos de produção. Fases mais iniciais de conceção de um produto podem apenas necessitar de peças de fraca qualidade, dando uso ao FA devido à grande velocidade a que os mesmos podem ser produzidos, enquanto que, em fases finais de conceção de produto, o produto possa requerer alguns passos extra como limpeza e acabamento de superfície (p. ex. pintura).

De uma forma genérica, o processo de FA pode ser dividido em oito etapas distintas: (Gibson *et al.*, 2010)

- **Modelo CAD:** Todos os processos de FA desenvolvem-se a partir de uma representação tridimensional detalhada da geometria a ser criada. Esta geometria pode ser criada recorrendo a *softwares* CAD, tendo em conta que o modelo final deverá ser um sólido 3D ou uma representação de superfícies. Também se pode recorrer à engenharia inversa, com a utilização de scan laser para a obtenção do modelo CAD.
- **Conversão para STL:** Este é o formato que se tornou *standard* para as máquinas de FA. Este formato descreve as superfícies exteriores do modelo CAD e é a base para a projecção das camadas a serem realizadas.

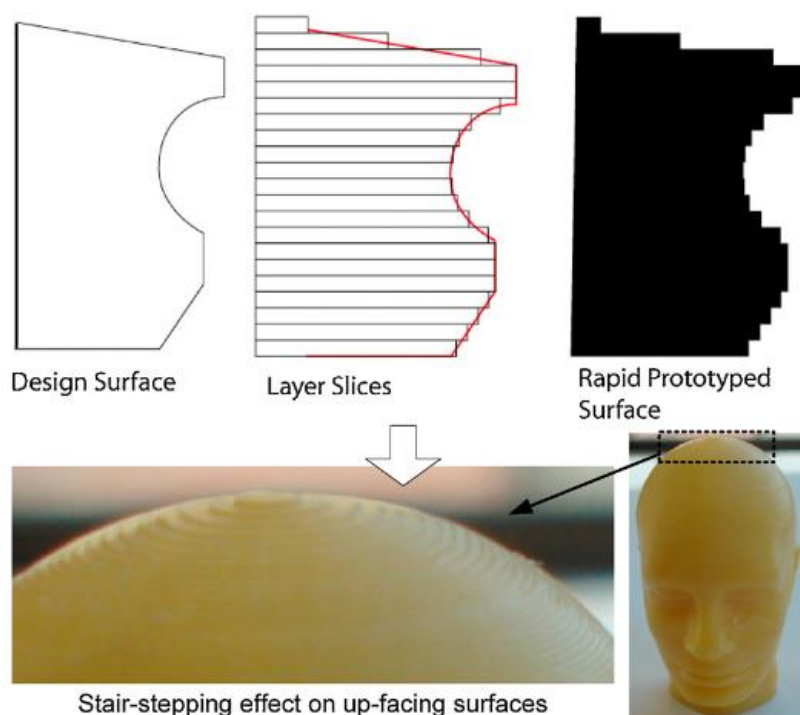
- **Transferência e manipulação do ficheiro STL:** O ficheiro criado anteriormente necessita de ser transferido para a máquina de FA a utilizar e modificado para obedecer ao tamanho correto, posição e orientação de construção.
- **Preparação da máquina:** Esta etapa engloba a divisão do modelo em sucessivas camadas (*layers*) de construção e a máquina de FA é programada consoante diferentes parâmetros, nos quais se destacam as propriedades mecânicas do material, fonte de energia e potência, espessura de camada e tempos de produção
- **Construção:** A construção do modelo é um processo praticamente automatizado, necessitando apenas de alguma supervisão superficial, de forma a garantir que pequenos erros como a falta de material ou falha de *software*, não ocorram.
- **Remoção:** Quando a máquina termina a construção, a peça tem de ser removida. Deve-se ter em atenção todas as normas de segurança devido à interação com a máquina;
- **Acabamento:** Após a sua remoção da máquina, algumas peças poderão requerer algum acabamento adicional, antes de estarem prontas a utilizar. Nesta fase ocorre a remoção de suportes de construção, tornando-se assim numa fase que requer algum tempo e cuidado especial.
- **Aplicação:** Após o decorrer de todas as fases enunciadas anteriormente, a peça está pronta para uso, exceto nos casos em que necessite de algum tratamento adicional e/ou pintura da superfície.



**Figura 3.2** – Modelo sólido, formato STL e separação por camadas, respetivamente (web)

A sobreposição de camadas para a obtenção de produto ou modelo desejado apresenta-se como vantajosa na medida em que possibilita o desenvolvimento de um componente tridimensional trabalhando apenas com seções bidimensionais. (Cooper, 2001)

No entanto, esta metodologia é normalmente acompanhada, como já referido, de acabamentos superficiais devido ao "efeito escada", isto é, irregularidades de superfície diretamente proporcionais à espessura da camada (Pan *et al.*, 2012).



**Figura 3.3** – “Efeito Escada” (Pan *et al.*, 2012)

### 3.3. Vantagens e Desvantagens do FA

#### 3.3.1. Liberdade de geometria

A grande vantagem da construção de um produto, recorrendo ao FA, é a independência da complexidade geométrica do mesmo. Permite o fabrico de modelos normalmente impossíveis de serem produzidos por outros processos, nomeadamente processos de subtração de material (Volpato, 2007).

A velocidade de fabrico, no entanto, continua a ser uma das grandes desvantagens, quando comparado com os processos convencionais. Estes processos oferecem uma maior taxa de produtos acabados com boa precisão dimensional e acabamentos superficiais. A remoção de suportes e outros acabamentos secundários inerentes ao processo de FA, tornam ainda esta tecnologia inviável e de rentabilidade baixa para a produção em série (Grenda, 2006).

### 3.3.2. Materiais

É possível a conceção de um determinado modelo numa variada gama de materiais tais como plásticos, cerâmicos, compósitos e metais. Existindo hoje em dia um grande interesse das diferentes empresas responsáveis pela comercialização de tecnologias FA para o desenvolvimento de materiais novos, como os biocompatíveis (Wohlers, 2014).

Outra grande vantagem deste tipo de fabrico é a possibilidade de controlar a evolução microestrutural de um determinado material. Desta forma, é possível seleccionar os materiais e otimizar a sua deposição de forma a melhorar as suas propriedades mecânicas (Grenda, 2006).

### 3.3.3. Eliminação de ferramentas

Utilizando o processo adequado, é possível obter um produto sem proceder a alguma troca de ferramenta. Sendo utilizado, do início ao fim do processo, um único meio de processamento do material seja este laser, deposição de material fundido, jato de tinta ou outros (Volpato 2007).

A possibilidade de produção de pequenos lotes é uma grande vantagem deste tipo de tecnologia quando comparado à fundição ou injeção, que, devido ao grande custo que o fabrico do molde implica, não permitem (Grenda, 2006).

Dependendo da aplicabilidade que a peça final irá ter, pode ser necessário recorrer a operações de acabamento adicionais, como já foi referido anteriormente.

### 3.3.4. Custos

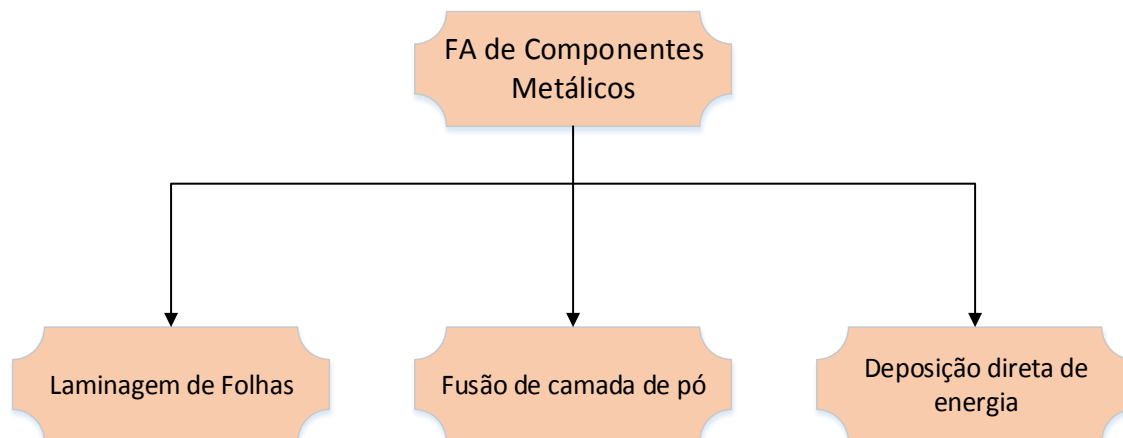
Para além da redução de custos associada ao fabrico da peça sem recurso a subsequentes operações, a utilização do FA também permite uma redução do número de operários envolvidos nesta tarefa, que a máquina, após iniciada, produz o produto de forma automatizada. No entanto, esta vantagem também poderá se tornar uma desvantagem, dependendo do equipamento a utilizar, pois necessita de operários mais especializados e com maior conhecimento técnico, o que pode conduzir a um aumento de despesas (Gibson *et al.* 2010)

Tratando-se de um processo aditivo de material, não existem grandes desperdícios de matéria-prima, permitindo uma grande redução de custos quando comparado a processos convencionais. No entanto, este tipo de tecnologia requer sempre uma quantidade significativa de *stocks*, algo que acaba por encarecer o processo em si (Grenda, 2006).

## 3.4. Fabrico aditivo de componentes metálicos

Pode-se afirmar que a produção de componentes metálicos por FA é possível por um elevado conjunto de diferentes processos, tendo cada um a sua designação de acordo com a empresa responsável pela sua criação e introdução no mercado. A divisão proposta, apresentada no

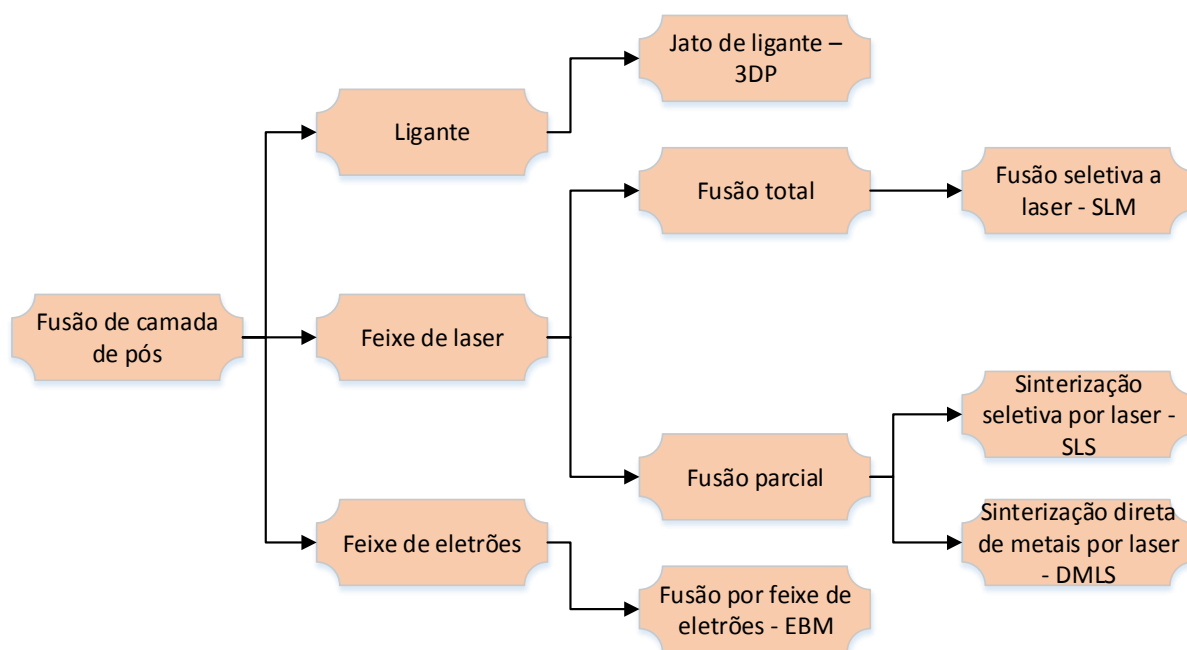
seguinte esquema, foi realizada tendo por base diferenças existentes ou no processo de fabrico ou na forma de como a matéria-prima é utilizada (Wohlers, 2014).



**Figura 3.4** – Processos de FA de componentes metálicos

Tendo em conta a atividade experimental realizada e apresentada numa fase posterior deste trabalho, os processos de maior importância são os pertencentes à categoria Fusão de camada de pó, nomeadamente o processo de SLM. Desta forma, esta descrição irá focar a sua atenção nesses tipos de processos.

#### 3.4.1. Fusão de camada de pó



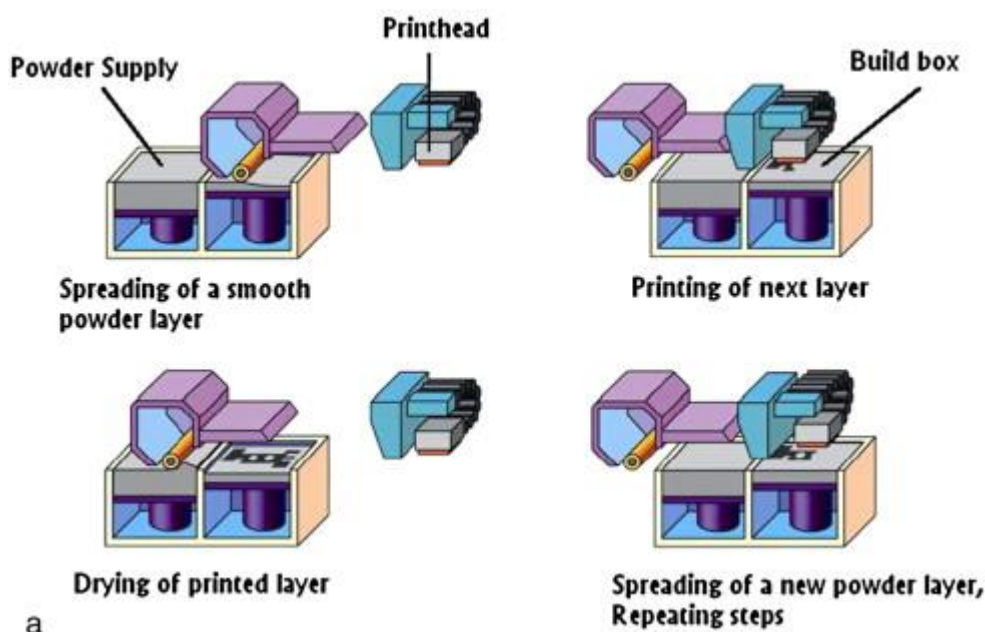
**Figura 3.5** – Diferentes processos inerentes à tecnologia de fusão de camada de pó (Karunakaran *et al.* 2013)

Nestes processos a matéria-prima encontra-se na forma de pó, sendo depois depositada por camadas. Uma camada de pó é depositada na área de trabalho ocorrendo depois a junção das partículas através da energia proveniente de um laser, de um feixe de elétrons ou mesmo através de jato de ligante líquido, dependendo do processo a ser utilizado (Karunakaran *et al.* 2013). Este processo repete-se até à peça final estar completa.

Analizando o mecanismo de união entre os pós metálicos e a fonte de energia utilizada, é possível dividir esta variante da tecnologia de FA em diferentes categorias, conforme apresentado na Figura 3.5.

### 3.4.2. Jato de ligante - 3DP

Processo de FA no qual os pós metálicos são depositados em camadas e unidos por um ligante líquido proveniente de uma cabeça de impressão. O elemento móvel espalha o ligante líquido sobre zonas pré-selecionadas da cama de pó para fabricação de componentes sem sinterização, através de ficheiros CAD e STL (Turker *et al.*, 2008). A Figura 3.6 ilustra o princípio de funcionamento deste processo.

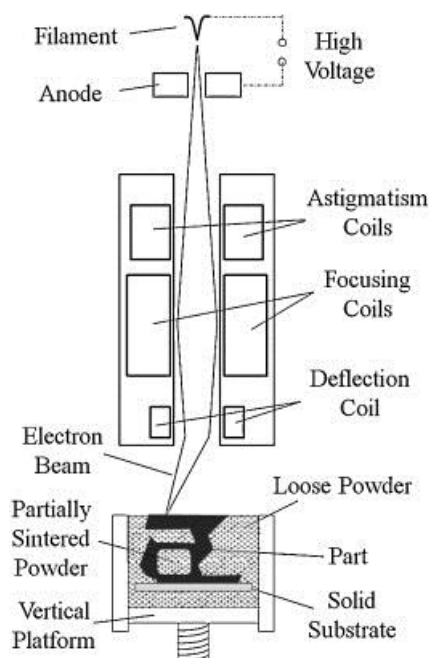


**Figura 3.6** – Princípio de funcionamento de 3DP (Turker *et al.* 2008)

A sua principal desvantagem encontra-se na necessidade aumentada de trabalhos de acabamento e a apresentação de elevada porosidade no produto final, mesmo após tratamentos térmicos, prejudicando assim as suas propriedades mecânicas (Utela *et al.*, 2008).



### 3.4.3. Fusão por feixe de elétrons – EBM



**Figura 3.7** – Esquema de processo EBM (Jamshidinia *et al.* 2014)

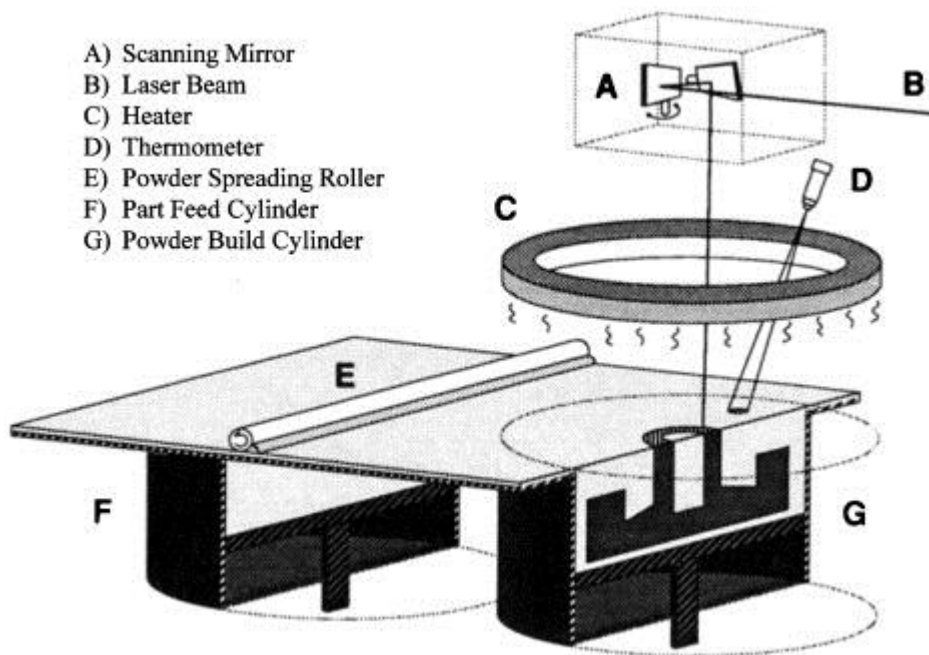
Desenvolvido pela empresa Arcam no final da década de 90, o processo de fusão por feixe de elétrons, EBM, apresenta-se como sendo um dos processos com maior capacidade de produção de peças metálicas densas, com propriedades mecânicas semelhantes ao metal no seu estado forjado (Safdar *et al.*, 2012). Ao contrário dos processos a laser, o EBM utiliza um feixe de elétrons obtidos por aquecimento de um filamento de tungstênio a altas temperaturas, para a fusão total dos pós metálicos. Esta fonte de energia permite uma alta eficiência energética (90%) e a atmosfera de trabalho, em vácuo, assegura a pureza do material e garante grande precisão do feixe de elétrons, uma vez que não há contacto por partículas do ar. Durante o processo, são efetuadas pequenas introduções de hélio na atmosfera para evitar a acumulação de carga elétrica nos pós metálico (Biamino *et al.*, 2011). A facilidade de obter diferentes potências caloríficas faz com que este processo possibilite a obtenção de componentes numa vasta gama de materiais (Safdar *et al.*, 2012).

A Figura 3.7 apresenta o esquema do processo de EBM assim como os seus constituintes. O filamento de tungstênio aquecido emite elétrons que são acelerados até uma energia cinética de, aproximadamente, 60 keV. O feixe de elétrons é controlado por duas bobinas eletromagnéticas, sendo a primeira uma lente magnética, responsável pela focalização do feixe até ao diâmetro desejado e a segunda responsável pela deflexão do feixe para a coordenada de construção. A cabeça de elétrons é fixa, não existindo movimento mecânico durante a construção de um determinado componente. A corrente do feixe varia, de forma controlada, entre 1 a 50 mA e o seu diâmetro pode ser focado até valores de 0,1 mm. A espessura da camada depositada pode variar entre 0,05 a 0,2 mm sendo que esta sofre aquecimento duas vezes: a primeira passagem, a uma velocidade muito elevada, serve para

aquecer os pós metálicos e a segunda, a uma velocidade inferior, para garantir a sua total fusão e união (Biamino *et al.* 2011; Mechanics & Safdar, 2010).

#### 3.4.4. Sinterização Seletiva por Laser – SLS

Foi o primeiro processo a aplicar a fusão de camada de pós na produção de componentes metálicos, sendo originário dos Estados Unidos pela empresa DTM com posterior comercialização e desenvolvimento pela *3D Systems* (Karunakaran *et al.* 2013). A Figura 3.8 ilustra o princípio de funcionamento deste processo.



**Figura 3.8** – Mecanismo de SLS (Nelson *et al.* 1993)

O processo é iniciado com a deposição de uma camada de pó metálico com revestimento polimérico, provenientes de ambas as câmaras de fornecimento, espalhada uniformemente sobre a plataforma de construção. De seguida, um feixe de laser, guiado por espelhos, incide sobre os pós, provocando assim o seu aquecimento de forma a promover a união entre as partículas por fusão do polímero (Grenda, 2006).

De forma a facilitar o processo de fusão parcial, a câmara de construção encontra-se a uma temperatura pouco inferior à temperatura de fusão do revestimento polimérico envolvente do pó metálico. Desta forma, a energia fornecida pelo laser necessita apenas de elevar ligeiramente a temperatura em vez de promover um aquecimento global da câmara. Com o intuito de prevenir problemas de oxidação e possíveis explosões provocadas pelo manuseamento de grandes quantidades de pó fino, a atmosfera é protegida com um gás inerte, normalmente azoto ou argon (Santos *et al.*, 2006).

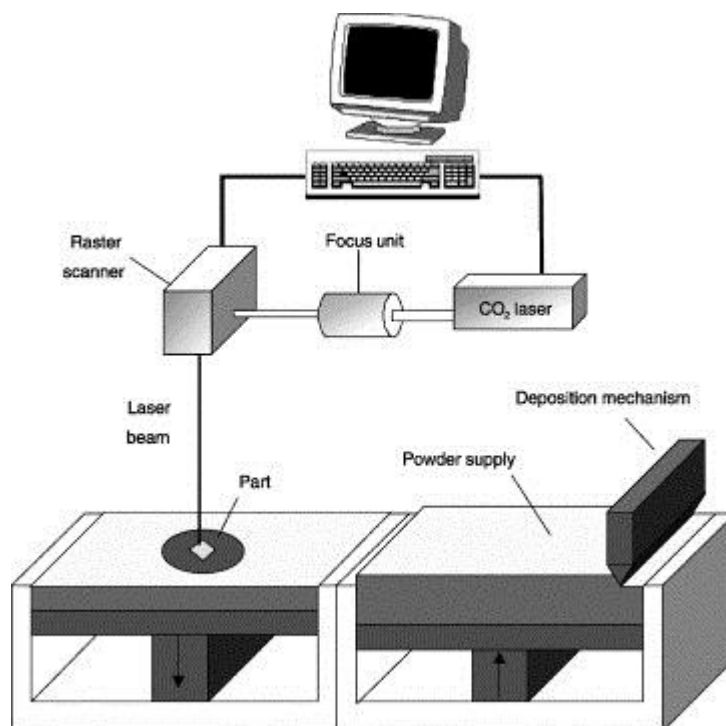
Com o produto finalizado, o cilindro de construção é elevado para posterior remoção e limpeza do excesso de pós. Posteriormente, é necessário aguardar pelo arrefecimento do mesmo, não permitindo retirar a peça logo após o final do processo (Grenda 2006).

### 3.4.5. Sinterização direta de metais por laser – DMLS

O processo de sinterização direta de metais por laser é um processo de FA originalmente desenvolvido pela EOS GmbH, oriunda da Alemanha, tendo iniciado a sua comercialização em 1995 com a introdução no mercado da máquina EOSINT M 250 (Khaing *et al*, 2001). Este processo tornou-se popular na obtenção de componentes metálicos, principalmente ferramentas e moldes de injeção, em relativamente pouco tempo. Isto deveu-se a poder produzir peças com formas geométricas difíceis, com uma densidade bastante elevada (Hänninen, 2001).

O funcionamento do processo é bastante semelhante ao SLS da *3D Systems*, sendo que a principal diferença reside na utilização de pó metálico sem qualquer revestimento polimérico aliado a um laser com uma potência superior. Esta diferença faz com que exista uma sinterização completa durante a fase de construção do componente. A conjugação de parâmetros como a potência do laser, as propriedades mecânicas do material e a velocidade de varrimento do feixe de laser pela camada depositada faz com que seja atingida uma densidade relativa de, aproximadamente, 100% (Karunakaran *et al*. 2013).

O DMLS consiste num mecanismo de sinterização que envolve uma fusão parcial dos pós metálicos, consoante a densidade energética do laser utilizado. A Figura 3.9 ilustra o mecanismo de funcionamento deste processo.

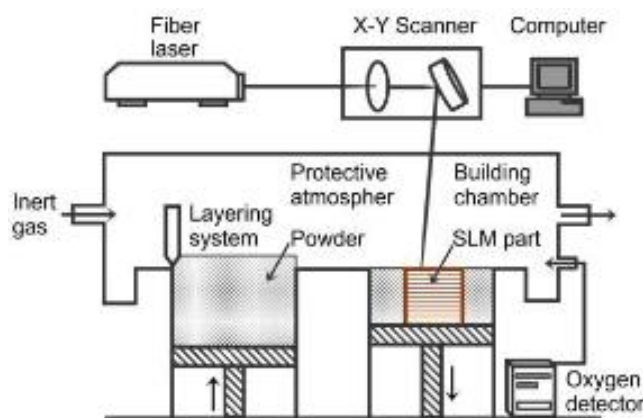


**Figura 3.9** – Esquema do processo DMLS da EOS (Simchi *et al*. 2003)

O laser realiza uma passagem pela plataforma ainda sem qualquer pó ter sido colocado sobre esta com o intuito de garantir uma melhor adesão aquando a sua introdução no sistema. O processo de fabrico inicia-se com a colocação do pó na plataforma que servirá como base para a construção do processo (Khaing *et al*, 2001).

### 3.4.6. Fusão seletiva a laser - SLM

*Selective Laser Melting* (SLM) é um processo de FA desenvolvido a partir da técnica de *Selective Laser Sintering* (SLS) e tem vindo a ser estudado desde 1990 (Sun *et al*, 2013). É reconhecido como uma técnica promissora devido à sua flexibilidade em matéria-prima e geometrias complexas (Vrancken *et al*, 2014). A técnica de SLM baseia-se na construção de protótipos e componentes funcionais, camada-a-camada, através de um laser de elevada energia varrendo e fundindo seletivamente a camada de pó metálico segundo a informação do CAD 3D da peça (Louvis *et al*, 2011). Esta técnica requer estruturas de apoio de forma a suportar a peça ao longo da produção e a auxiliar a condução de calor/ energia durante o processamento. Estes apoios são fabricados com o mesmo material da peça, e são removidos após término da produção. O *software* do equipamento processa o modelo CAD 3D e as estruturas de suporte, dividindo numericamente em camadas horizontais com uma espessura definida contendo informações específicas sobre os parâmetros de processamento como potência de laser (W), velocidade de varrimento (mm/s), distância de feixes (mm) e espessura de camada (mm) (Löber *et al*, 2014).



**Figura 3.10** – Esquema de funcionamento do processo SLM (Gu *et al*. 2014)

As propriedades das peças obtidas por esta técnica dependem fortemente dos parâmetros de processamento tais como potência de laser, velocidade de varrimento, distância de feixes e espessura de camada, como mencionado anteriormente (Li *et al*, 2010).

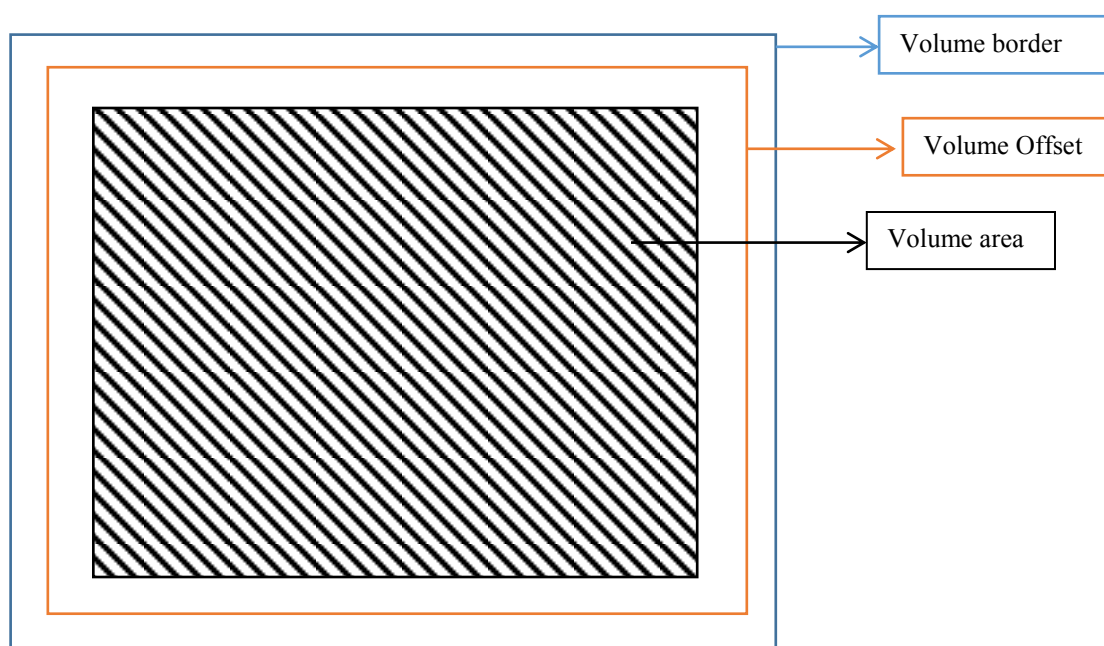
$$\text{Densidade de energia [J/mm}^3\text{]} = \frac{\text{Potência de laser [W]}}{\text{Velocidade de varrimento } \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right] * \text{Distância de feixes [mm]} * \text{Espessura de camada [mm]}}$$

(1)

- A potência do laser (W) corresponde à quantidade de energia necessária para fundir o pó através de uma fonte, neste caso de um laser, por unidade de tempo.
- A distância de feixes (mm) corresponde à distância entre as passagens do laser.
- A velocidade de varrimento (mm/s) corresponde à distância percorrida pelo laser num determinado tempo.
- A espessura da camada (mm) corresponde à altura de cada camada de pó a processar.

Estudos mostram que uma potência de laser elevada, velocidade de varrimento mais baixa, distância de feixes reduzida e espessura da camada mais fina permite obter um acabamento superficial mais suave e, consequentemente, uma peça mais densa (Li *et al*, 2010).

O comportamento que o laser tem em cada camada é o ilustrado na imagem abaixo, figura 1. O laser faz o contorno da peça (*volume border*), de seguida o interior da peça (*volume area*) e posteriormente une o interior com o contorno (*volume offset*) refundindo essas zonas. O *software* de alguns equipamentos, tal como Autofab para o equipamento SLM 125HL, permite alterar os parâmetros para cada uma dessas zonas.



**Figura 3.11** – Comportamento do laser ao longo do processamento na camada

Este processo proporciona muitas vantagens em relação aos métodos convencionais, tais como diversidade de materiais, alto nível de flexibilidade e construção de peças com formas geometricamente complexas, elevada precisão dimensional e produção num curto período de tempo (Riemer *et al*, 2014). O processo SLM possibilita otimizar os parâmetros de fusão das ligas metálicas (Dadbakhsh *et al*, 2012).

Alguns estudos mostram que processar aço inoxidável 316L por SLM apresenta vantagens em relação aos métodos convencionais. As propriedades de fadiga e resistência à corrosão são

semelhantes ao material processado convencionalmente, mas apresenta elevada resistência à rutura mesmo sem pós-tratamento térmico quando processado por SLM e não mostra transformação de fase após arrefecimento (Riemer *et al*, 2014).

Embora o processo de SLM tenha sido melhorado consideravelmente durante os últimos anos, a ocorrência de defeitos nas peças obtidas, tais como a deformação estrutural, porosidade irregular, fissuras, e *balling*, influenciam as propriedades mecânicas, impedindo desta forma o sucesso desta técnica de fabrico aditivo (Joo *et al*, 2009). A qualidade da superfície e o tamanho limitado das peças também são desvantagens encontradas neste processo (Prashanth *et al*, 2014)

Devido a estes defeitos é, por vezes, necessário pós-tratamento de forma a alcançar uma maior resistência à fadiga. Este procedimento torna a técnica mais demorada e, portanto, mais dispendiosa (Riemer *et al*, 2014).

A Tabela 3.1 mostra alguns equipamentos que utilizam a tecnologia de SLM.

**Tabela 3.1** - Alguns equipamentos que trabalham com a técnica de SLM (Riemer *et al*. 2014; Sun *et al*. 2013; Yadroitsev *et al*. 2010; Ziółkowski *et al*. 2014; Li *et al*. 2014; Dadbakhsh *et al*. 2012; Louvis *et al*. 2011)

Equipamento	SLM 125HL	SLM HL	250	DiM et al-280 SLM	SLM machine PM 100	SLM Realiser II	HRPM – II SLM	MCP Realizer SLM 250	Two MCP Realizer 100
Laser (W)	yttrium fiber laser (100W)	yttrium fiber laser (400W)		yttrium fiber laser (200 W)	yttrium fiber laser (50W)	yttrium fiber laser	yttrium fiber laser	Lasers Nd:YA G (120W)	ytterbium fibre laser (50 e 100W)
Atmosfera	Árgon	Árgon		Árgon	Azoto	-----	Árgon	Árgon	Árgon
Dimensões de produção (mm)	250*250 *200	-----		280* 280* 300	-----	-----	250*250 *200	50*25* 10	280*280*3 00

A técnica SLM possui um grande potencial para o fabrico de componentes de alta qualidade que não podem ser facilmente fabricado por métodos convencionais (Yadroitsev *et al*, 2010).

A SLM tem sido amplamente utilizada na área da indústria, medicina, automóvel, aeronáutica, náutica, entre outros (Sun *et al*, 2013).

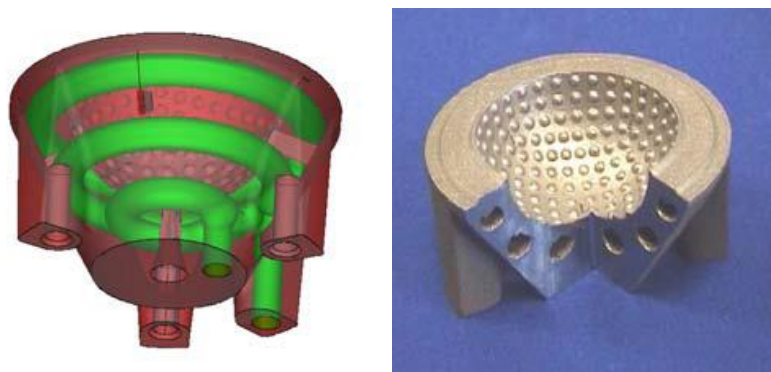
Os materiais mais usados para a aplicação:

- Médica: Ligas de titânio (Sun *et al*, 2013), ligas de cobalto (Hedberg *et al*, 2014);

- Aeronáutica: Ligas de titânio (Löber *et al*, 2014), ligas de aço (Louvis *et al*, 2011), ligas de alumínio (Riemer *et al*, 2014);
- Civil: Ligas de titânio (Sun *et al*, 2013), ligas de aço (Louvis *et al*, 2011);
- Automóvel: Ligas de alumínio (Thijs *et al*, 2013);
- Náutica: Ligas de níquel (Jia e Gu, 2014)

### 3.5. Fabrico aditivo de moldes

O fabrico de moldes é geralmente um processo dispendioso, envolvendo diversos passos de processo, equipamentos caros e mão-de-obra qualificada. Usando tecnologias de produção convencionais, até mesmo um molde de injeção relativamente simples de duas partes pode requerer processos de fresagem CNC combinado com máquinas de electroerosão (EDM) para produzir a geometria da cavidade (lado de injeção) e da bucha (lado da extração). A fresagem pode exigir a remoção de grandes quantidades de material a partir de um bloco de metal e etapas separadas para desbaste e acabamento, requerendo um técnico especializado para a geração dos programas de maquinação. Geometrias mais complexas podem possuir fendas profundas ou cantos internos que não podem ser fresados, recorrendo então ao processo de electroerosão para produção dos mesmos (Shellabear & Weilhammer 2007; Khaing et al. 2001). Utilizando todo este processo para peças mais complexas, o custo de fabrico do molde pode aumentar exponencialmente.

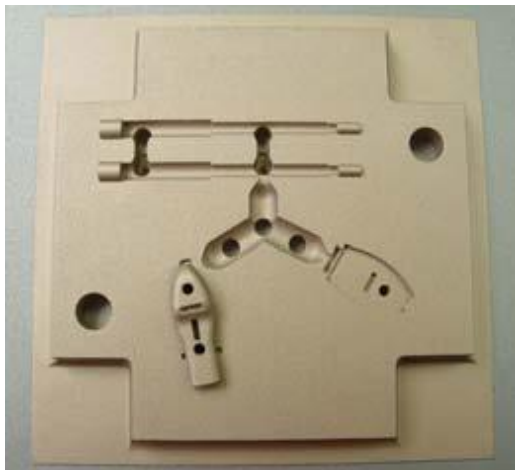


**Figura 3.12** - Modelo CAD de molde com canais de refrigeração conformáveis e respetiva peça fabricada através de DMLS (Shellabear & Weilhammer, 2007)

Cientes deste problema, várias empresas, como a EOS GmbH, focaram-se nos últimos anos na produção de ferramentas através das técnicas de fabrico aditivo. A produção de moldes com recurso a estas tecnologias traduz-se numa grande vantagem em termos de tempo de produção e custos, uma vez que todo o molde pode ser produzido num só processo. A liberdade de construir qualquer tipo de geometria também se traduz em uma vantagem na construção de canais de refrigeração conformáveis. No entanto, como já foi dito anteriormente, este tipo de tecnologias apresenta uma enorme desvantagem em termos de

acabamento superficial, o que é um constrangimento para a construção de moldes através destes processos.

A EOS GmbH tem, ao longo dos anos, estudado a produção de moldes através do processo de DMLS, focando-se também na otimização do processo de refrigeração através do uso de canais de refrigeração conformáveis.



**Figura 3.13** - Postiço fabricado pelo equipamento EOSINT M270 (Shellabear & Weilhammer, 2007)

Para além da EOS, outras empresas investiram neste problema tentando encontrar soluções. A Stratasys é outro exemplo, com a sua tecnologia *PolyJet*.

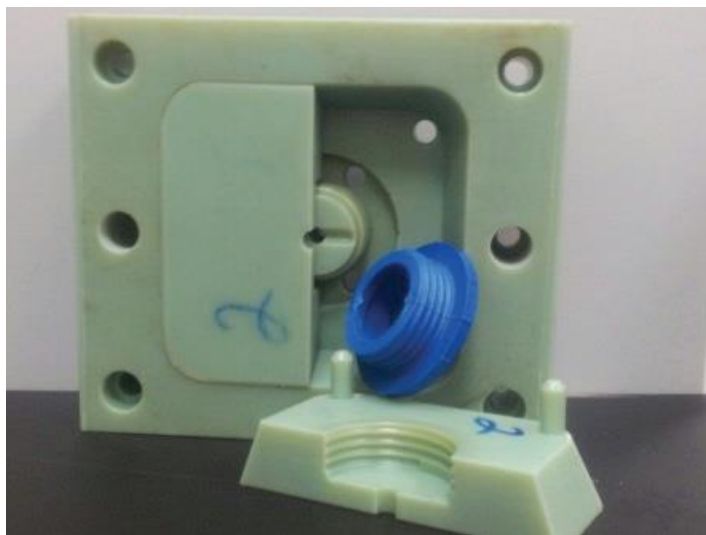


**Figura 3.14** - Equipamento PolyJet (Zonder & Sella, 2013)

A tecnologia PolyJet é um método exclusivo de impressão 3D da Stratasys que dá às empresas a capacidade de construir moldes de injeção de forma rápida e fácil. A impressão PolyJet cria objetos 3D posicionando camadas sucessivas foto polímero de líquido com as configurações desejadas. O plástico é, então, curado com luz UV. Depois de completamente curado, os moldes podem ser imediatamente colocados no equipamento de injeção e utilizados para fabricar peças. No entanto, a própria empresa avisa que este processo não tem o intuito de substituir os processos convencionais de produção, mas sim auxiliar todo esse processo. A ideia é minimizar o prejuízo durante o tempo de espera do fabrico do molde em



aço, permitindo retirar peças de boa qualidade com o molde produzido rapidamente pela Polyjet, enquanto o molde em aço se encontra em produção. Este processo permite também a fabricação rápida de vários protótipos da peça a produzir, para estudo e otimização da mesma antes da sua produção em massa. (Zonder & Sella, 2013).



**Figura 3.15** - Molde de injeção em ABS fabricado por um equipamento PolyJet (Zonder & Sella 2013)

### 3.6. Topologias internas

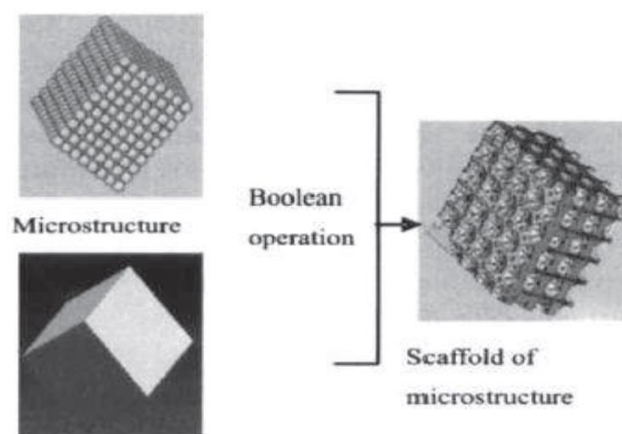
A tecnologia de SLM permite a produção de peças de densidade quase absoluta com uma liberdade geométrica infinita, conduzindo à produção de peças metálicas com propriedades mecânicas semelhantes, ou ainda melhores, às dos materiais que lhes deram origem (Yasa *et al.* 2010).

Embora muito do trabalho inicial relacionado com a tecnologia SLM tenha-se focado na redução de porosidade e na produção de componentes quase densos, estudos mais recentes aplicam esta tecnologia como ideal na produção de componentes estruturais constituídos por uma rede de poros interconectados de forma controlada e otimizada (Fox *et al.* 2008).

O fabrico de protótipos funcionais com este tipo de estrutura interna, necessita de ser alvo de uma análise criteriosa em relação à porosidade do modelo, tamanho dos poros, características do tipo de estrutura interna e sua consequente resistência mecânica (Liulan *et al.* 2007).

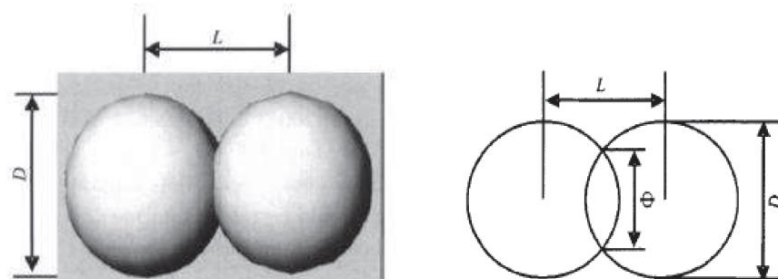
A possibilidade de produzir protótipos com elevada porosidade, mas igualmente resistentes, através de topologias internas modeladas na fase de projeto é uma das grandes vantagens inerentes ao fabrico por SLM. Com o estudo efetuado neste projeto, pretende-se mostrar que a aplicação destes conceitos na indústria dos moldes poderá, eventualmente, permitir a obtenção de moldes funcionais, significativamente mais leves e com um comportamento térmico otimizado, sem que a fiabilidade destes seja posta em causa.

Para o desenvolvimento de uma topologia interna a primeira fase passa pela criação do modelo interior da micro estrutura com recurso a *software* CAD, podendo então proceder-se de seguida à agregação das unidades do modelo de forma a criar um bloco tridimensional composto pelas microestruturas. O resultado da associação destas unidades resulta num modelo negativo da real microestrutura interna e, recorrendo a operações Booleanas, como se encontra ilustrado na Figura 3.16, obtém-se o modelo com a topologia interna modelada (Liulan et al. 2007).



**Figura 3.16** – Criação de estruturas internas (Liulan *et al.* 2007)

De forma a obter uma estrutura rígida e com propriedades mecânicas estáveis, é necessário assegurar uma conectividade entre as microestruturas, como representa a Figura 3.17.



**Figura 3.17** – Conectividade entre microestruturas (Liulan *et al.* 2007)

O avanço das tecnologias de FA abrem portas à imaginação no que diz respeito à produção de geometrias internas, apresentando uma total liberdade construtiva podendo, deste modo, produzir protótipos funcionais de forma a testar diferentes topologias internas.

Focando estes métodos na produção de moldes, é importante estudar estruturas internas que possuam não só um bom comportamento mecânico, mas também características do ponto de vista térmico, que permitam otimizar os ciclos de aquecimento/arrefecimento da zona moldante do mesmo.

No capítulo que se segue foram modeladas diferentes geometrias internas com porosidades distintas com o objetivo de avaliar a possibilidade de obter componentes igualmente resistentes mas significativamente mais leves e com uma melhor eficiência térmica.



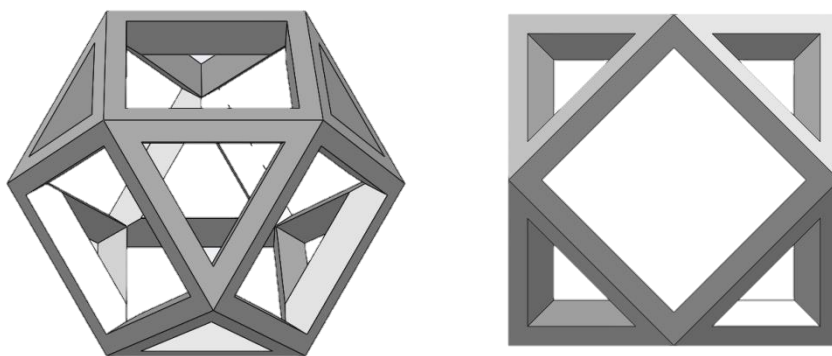
## 4. DESENVOLVIMENTO DE TOPOLOGIAS INTERNAS

De forma a usufruir de todas as potencialidades oferecidas pelas técnicas de FA descritas anteriormente, diferentes topologias internas foram desenvolvidas para posteriormente produzir sobre a forma de provete de teste, possibilitando assim a avaliação de cada uma das estruturas a nível mecânico e térmico, com o intuito de concluir qual apresenta melhor comportamento.

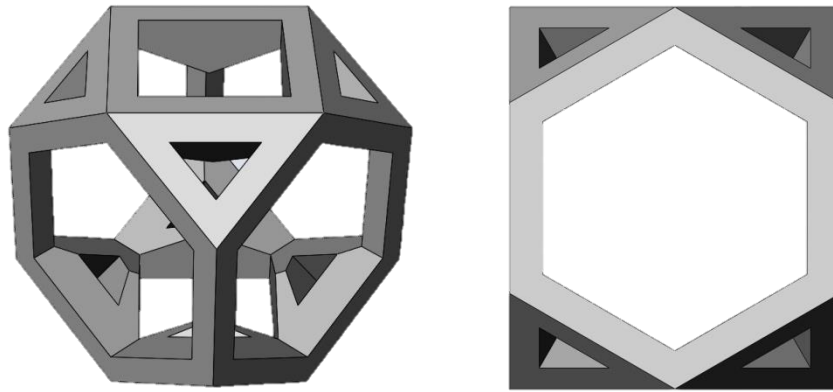
Como já foi descrito anteriormente, uma das formas de modelação das estruturas é a partir de operações Booleanas, através da união, subtração ou da intersecção de duas entidades ou objetos. No entanto, neste projeto em concreto, decidiu-se colocar de parte esta ferramenta matemática e optou-se pela modelação de raiz das geometrias alveolares com recurso ao *software* de modelação tridimensional SolidWorks.

Uma pesquisa foi efetuada para a definição das geometrias internas, uma vez que as tecnologias existentes permitem adotar formas cilíndricas, hexaédricas, octaédricas, dodecaédricas, etc., desde que as mesmas sejam regulares. Ou seja, desde que se torne exequível a construção de um provete com repetição destas unidades nas três diferentes direções originando um conjunto coeso em que todas as unidades estão em contacto com as unidades modulares que as circundam (Liebschner, 2009).

No entanto, para iniciar testes, uma pequena amostra de geometrias internas teve de ser definida, e, após alguma pesquisa, foi decidido o desenvolvimento de duas unidades. Desta forma, no presente estudo, foram modeladas duas unidades modelares não maciças distintas, uma unidade cuboctaédrica e uma unidade de face hexagonal, conforme representado pelas Figuras 4.1 e 4.2, respetivamente.



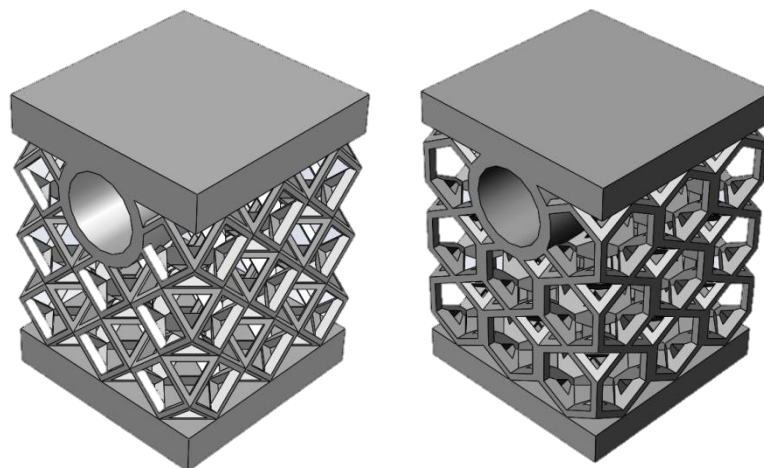
**Figura 4.1** – Modelo unidade cuboctaédrica, vista isométrica e frontal, respetivamente



**Figura 4.2** – Modelo unidade de face hexagonal, vista isométrica e frontal, respectivamente.

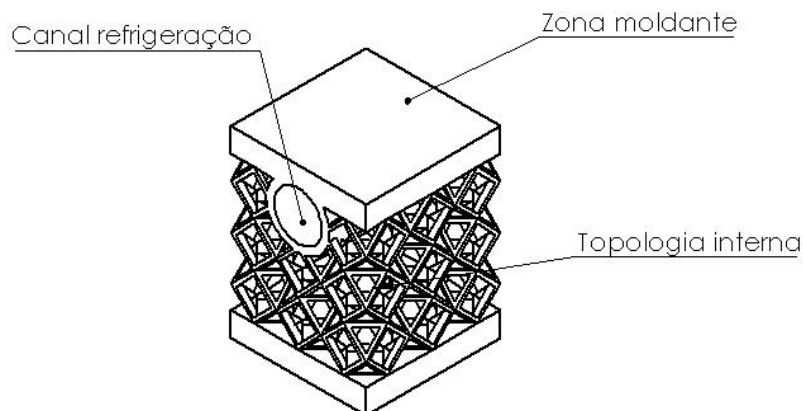
A unidade cuboctaédrica foi modelada tendo como base uma estrutura de treliça, devido ao seu conhecido bom comportamento mecânico, existindo já alguma investigação na produção deste tipo de microestruturas produzidas com recurso a SLM (McKown *et al.* 2008; Gümrük & Mines 2013; Li *et al.* 2014). A segunda estrutura recebe a sua inspiração na natureza, nos favos de mel criados pelas abelhas. As estruturas em favo de mel têm sido amplamente utilizadas como absorvedores de energia para resistir a cargas externas, devido à sua alta capacidade de absorção de energia (Hong *et al.* 2006). O comportamento mecânico desta geometria de estrutura, também tem sido alvo de um forte estudo ao longo dos anos (Wierzbicki, 1983; Wu & Jiang, 1997; Mohr & Doyoyo, 2003; Zhou & Mayer, 2002)

De forma a possibilitar o estudo do comportamento mecânico e térmico de peças com estruturas internas construídas com as geometrias acima demonstradas, foi necessário proceder a uma modelação de provetes através da repetição de cada uma das respectivas unidades, como é possível observar na Figura 4.3.



**Figura 4.3** – Modelo provete concebido com estrutura cuboctaédrica e hexagonal, respectivamente.

Estes provetes têm o objetivo de simular um excerto de uma estrutura de um molde, sendo que a face superior simula a parede da zona moldante que estaria em contacto com o material fundido e a furação circular representa um canal de refrigeração para essa mesma zona moldante.



**Figura 4.4** – Detalhe da estrutura dos provetes.

Devido aos elevados custos associados ao uso do equipamento de SLM, os excertos para teste foram projetados de forma a possuir uma dimensão reduzida, possuindo cerca de 17 mm de comprimento por 17 mm de largura e 23 mm de altura. O canal de passagem de água possui 6 mm de diâmetro interno e as paredes superior e inferior possuem ambas 3 mm de espessura.

## 5. ESTUDO NUMÉRICO

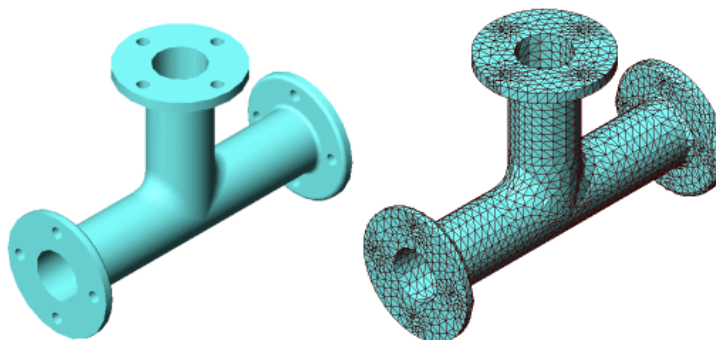
De forma a poder avaliar a influência de cada uma das topologias internas no comportamento mecânico e térmico de um componente ou protótipo quando solicitado externamente, foi necessário proceder a um estudo numérico através do *software SIMULATION*. Será possível desta forma retirar conclusões sobre o comportamento destas peças, podendo mais tarde ser reforçadas ou validadas por ensaios experimentais.

### 5.1. SolidWorks Simulation

Como já foi descrito anteriormente, a utilização de ferramentas CAE no desenvolvimento de um produto, tornou-se um sistema fundamental para a otimização dos tempos de produção e características do mesmo. A utilização deste processo permite diminuir o tempo de colocação de produtos no mercado, reduzir custos e ainda melhorar a qualidade de produção.

A ferramenta *Simulation*, integrada totalmente no ambiente do *software* Solidworks, apresenta-se como uma opção para realizar análises numéricas estáticas, térmicas, de fadiga, de encurvadura, entre outras. A grande vantagem desta ferramenta é a “desnecessidade” de transferência de dados e facilidade de editar o modelo a estudar, por estar implementado no próprio *software* CAD. Desta forma, permite-nos que o desenvolvimento de um determinado produto seja efetuado de forma rápida, otimizada e económica, permitindo ainda aos projetistas detetar problemas mais rapidamente do que se recorresse a um protótipo físico. Com recurso ao Método dos Elementos Finitos (MEF), o *Simulation* fornece uma técnica numérica fiável para análises a diferentes cenários de engenharia.

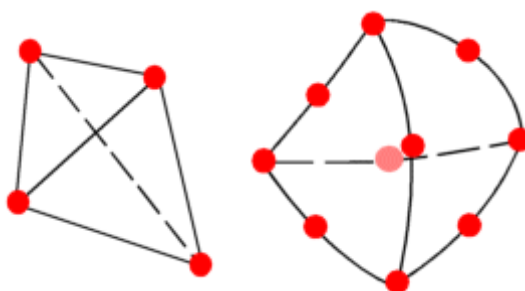
O processo é iniciado com a criação do modelo, procedendo o *software* à subdivisão do mesmo em pequenas partes, denominadas de elementos, conectadas por pontos comuns, chamados de nós. Esta subdivisão é denominada como malha, sendo que é a qualidade desta que define maioritariamente a precisão dos resultados obtidos.



**Figura 5.1** – Modelo virtual sólido e malha sólida do modelo, respetivamente (Solidworks, 2011)



Antes de iniciar o processo de cálculo que assenta no método dos elementos finitos é necessário definir qual o tipo de elementos finitos a utilizar em função do tipo de análise que se pretende fazer. No Simulation, ao efetuar uma malha num modelo sólido, o *software* gera automaticamente um de dois tipos de elementos, elementos tetraédricos lineares ou elementos tetraédricos parabólicos. Os elementos lineares são os chamados de primeira ordem e são definidos por quatro nós de canto interligados por seis linhas retas. Os elementos parabólicos, denominados elementos de segunda ordem ou ordem superior, são definidos por quatro nós de canto e seis nós de dimensão intermédia, interconectados por seis arestas. A Figura 5.2 apresenta cada um dos elementos descritos acima.



**Figura 5.2** – Elemento linear e elemento parabólico, respetivamente (Solidworks, 2011)

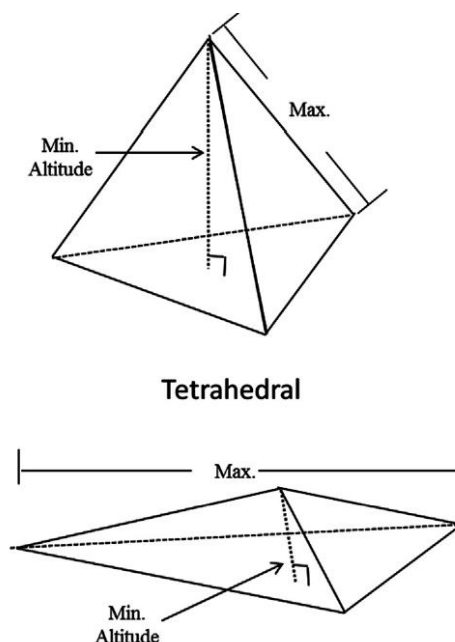
No geral, comparando o mesmo número de elementos numa malha, os elementos parabólicos traduzem melhores resultados que os lineares, pelo facto de representarem as fronteiras curvas de uma forma mais aproximada e por produzirem melhores aproximações matemáticas. No entanto, estes elementos requerem um recurso computacional bastante superior na criação da malha do que os elementos lineares.

Para os problemas estruturais, cada nó de um elemento sólido possui três graus de liberdade que representam a translação em três direções ortogonais. O *software* utiliza as direções X,Y e Z do sistema cartesiano. Para os problemas térmicos, cada nó possui apenas um grau de liberdade, sendo ele a temperatura. Para ambos os ensaios, térmicos e estruturais, foi este o software utilizado.

## 5.2. Parâmetros da malha

A precisão e eficiência de simulações de elementos finitos é altamente dependente da qualidade da malha dos elementos finitos (Knupp 2007). Knupp (2007), define a expressão "qualidade da malha" como "as características de uma malha que permitem uma determinada simulação numérica ser realizada de forma eficiente com a fidelidade à física subjacente e com a precisão requerida para o problema". Dois problemas principais ocorrem quando se considera qualidade da malha de elementos finitos. O primeiro é a forma dos elementos que são escolhidos para discretizar a geometria, como foi explicado no subcapítulo anterior. Outro aspeto bastante importante na definição da qualidade da malha é o chamado "*Aspect Ratio*". O *Aspect Ratio* (AR) é uma medida relativamente simples que quantifica a forma de cada

elemento na malha. O AR de elementos tetraédricos é medido como sendo a razão entre o comprimento de aresta mais longa dividida pela altura mínima do lado menor, como demonstrado na Figura 5.3 (Burkhart et al. 2013).



**Figura 5.3** – Comparação de elemento com AR de valor 1 e elemento com AR de valor 14, respectivamente (Burkhart et al. 2013)

As soluções mais fidedignas são alcançadas quando o AR se encontra próximo do valor 1. No entanto, tentar otimizar todos os elementos a este valor pode-se traduzir numa malha muito pesada, difícil de construir e com elementos desnecessários (Fellipa 2012). Como resultado, é sugerido que valores de AR de elementos hexaédricos entre 1 a 3 sejam considerados aceitáveis, entre 3 a 10 para serem tratados com cuidado e elementos com AR superior a 10 para serem tomados em conta com alarme (Ray et al. 2008; Fellipa 2012). Em relação aos elementos tetraédricos, existe menos informação, mas também é definido que elementos com AR variando entre 1 e 4 produzem resultados otimizados (Tsukerman & Plaks 1998).

No entanto, não só o valor do AR é importante para a qualidade da malha, mas também a localização dos elementos mais alarmantes. Desta forma é recomendado que a percentagem de elementos com AR superior a 3, se mantenha abaixo dos 5% (Quenneville & Dunning 2011).

Para os estudos numéricos do presente projeto, foram geradas malhas automáticas no *Simulation*, com elementos tetraédricos, seguindo todas as linhas de orientação descritas acima.

### 5.3. Estudo estrutural

O estudo numérico do ensaio de compressão tem o intuito de simular o ensaio experimental, desta forma, para obter resultados que possam servir de base de comparação aos resultados

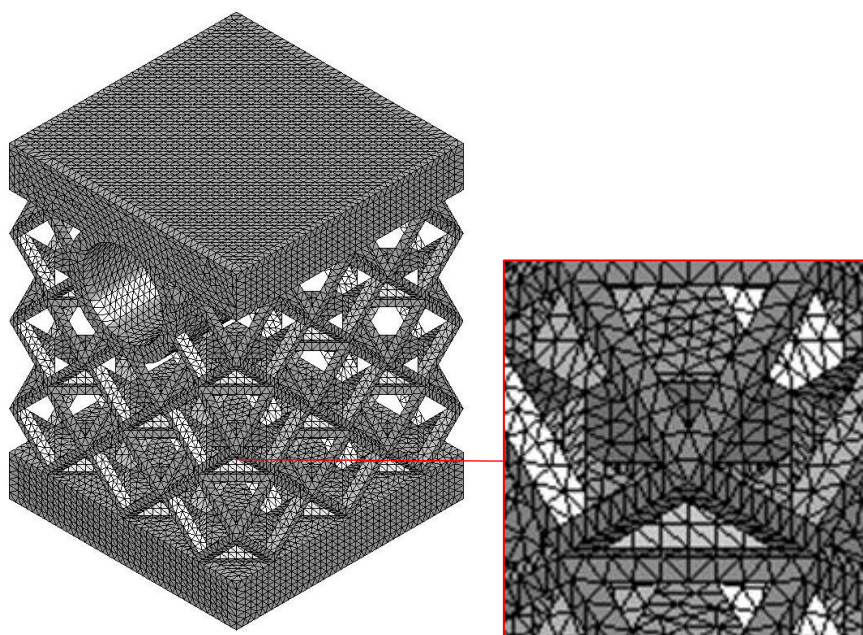
experimentais, todos os pormenores do ensaio experimental foram recriados com exatidão no estudo numérico. A carga aplicada no estudo numérico simula o prato da célula de carga de um equipamento de testes, adotando um movimento descendente promovendo assim uma pressão na área de contacto com o provete. A restrição do prato inferior também foi tomada em conta, bem como a posição do provete.

Tendo tudo isto em conta, o estudo foi realizado com a aplicação de uma carga estática distribuída no topo do provete com a opção “load”. Esta carga adotou o valor de 10 kN, que aplicável sobre essa área do topo do provete traduz-se numa pressão na ordem de 340 bar, sendo esta uma pressão bastante comum em aplicações de moldes de injeção. Para a fixação do provete, foram restringidas as translações e rotações da base do mesmo, com a opção “fixed geometry”.

Ambos os ensaios de cada uma das diferentes topologias internas, obedece aos parâmetros indicados acima. A criação da malha foi efetuada seguindo todas as indicações já descritas anteriormente.

### 5.3.1. Provete cuboctaedro

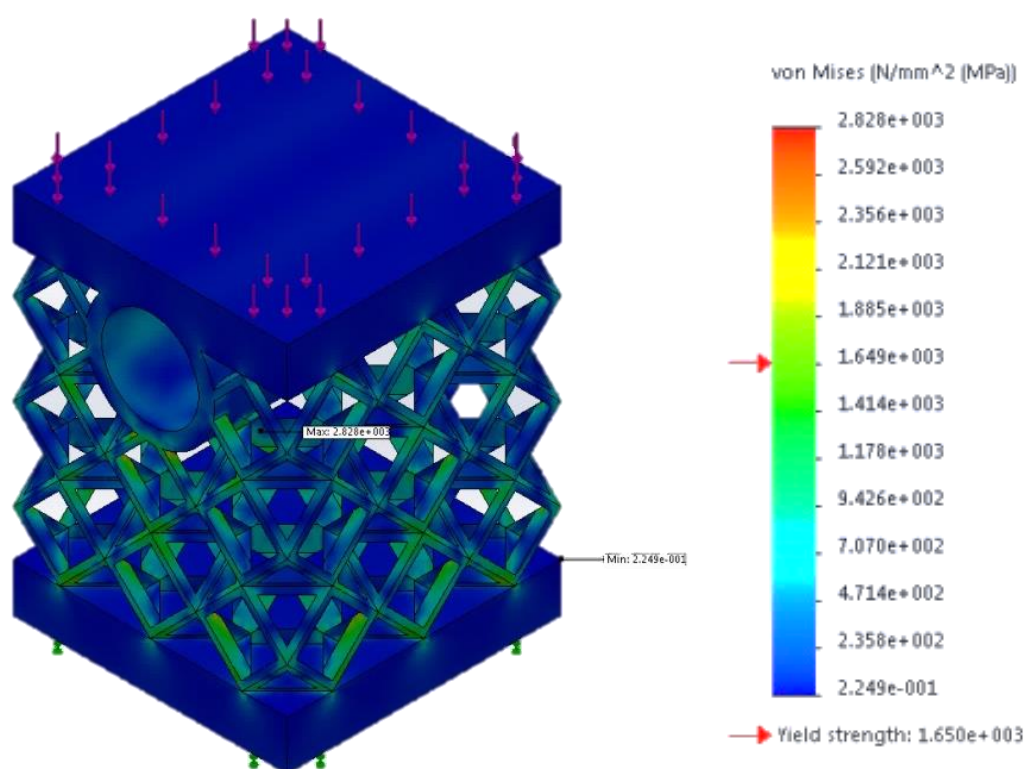
Tendo em consideração os aspetos referidos no subcapítulo 5.2, a malha do provete foi construída como sendo de alta qualidade, possuindo um AR máximo de 6,62, sendo que 99,8 % dos elementos possuem um AR menor que 3. Apesar do modelo possuir formas geométricas complexas, o tempo decorrido para a construção da malha foi bastante reduzido, no valor de 43 segundos, devido às dimensões reduzidas do provete. No entanto, o aumento do tamanho do provete ou a variação da porosidade do mesmo, pode vir a influenciar bastante este número.



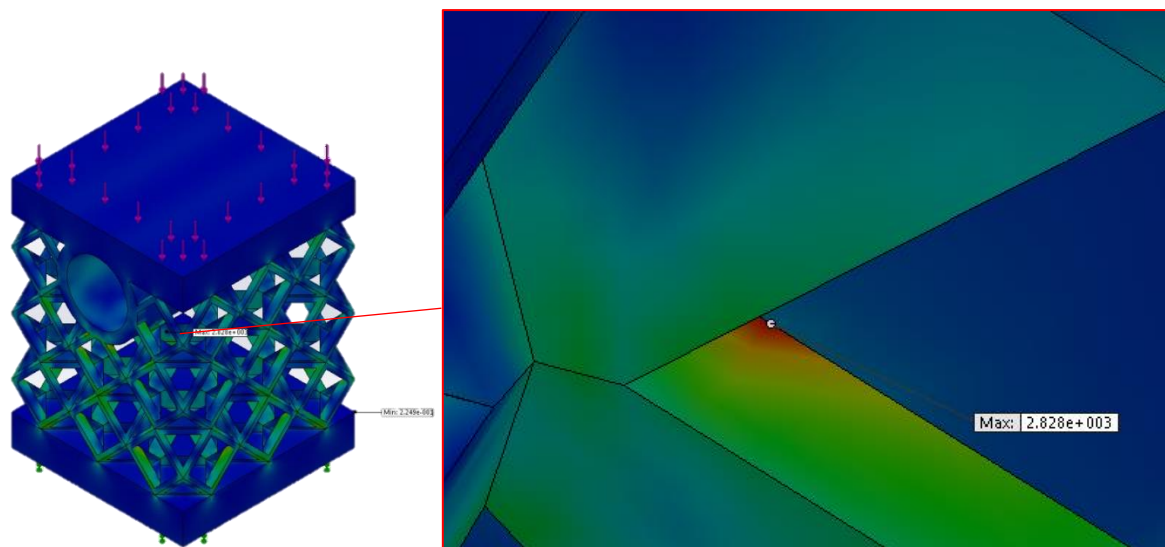
**Figura 5.4** – Malha obtida para o provete cuboctaedro**Tabela 5.1** – Detalhes da malha do provete cuboctaedro

<b>Total Nodes</b>	384076
<b>Total Elements</b>	240791
<b>Maximum Aspect Ratio</b>	6.622
<b>% of elements with Aspect Ratio &lt; 3</b>	99.8
<b>% of elements with Aspect Ratio &gt; 10</b>	0
<b>% of distorted elements(Jacobian)</b>	0
<b>Time to complete mesh(hh:mm:ss):</b>	00:00:43
<b>Computer name:</b>	C6-PROJ-M03

Para o estudo de compressão efetuado nas condições descritas anteriormente, apresentam-se na Figura 5.5 os resultados obtidos para a geometria interna cuboctaedro.

**Figura 5.5** – Tensões aplicadas durante o ensaio para o provete cuboctaedro

Os resultados encontrados para este ensaio demonstram, que para a carga aplicada de 10 kN, a tensão de rotura do material irá ser ultrapassada em algumas zonas do provete. No geral, grande parte da geometria encontra-se sujeita a uma tensão bastante abaixo da de cedência. A rotura do provete acontece devido à concentração de tensões num ponto, ultrapassando assim a tensão de cedência do material nessa zona, como representado na Figura 5.6.

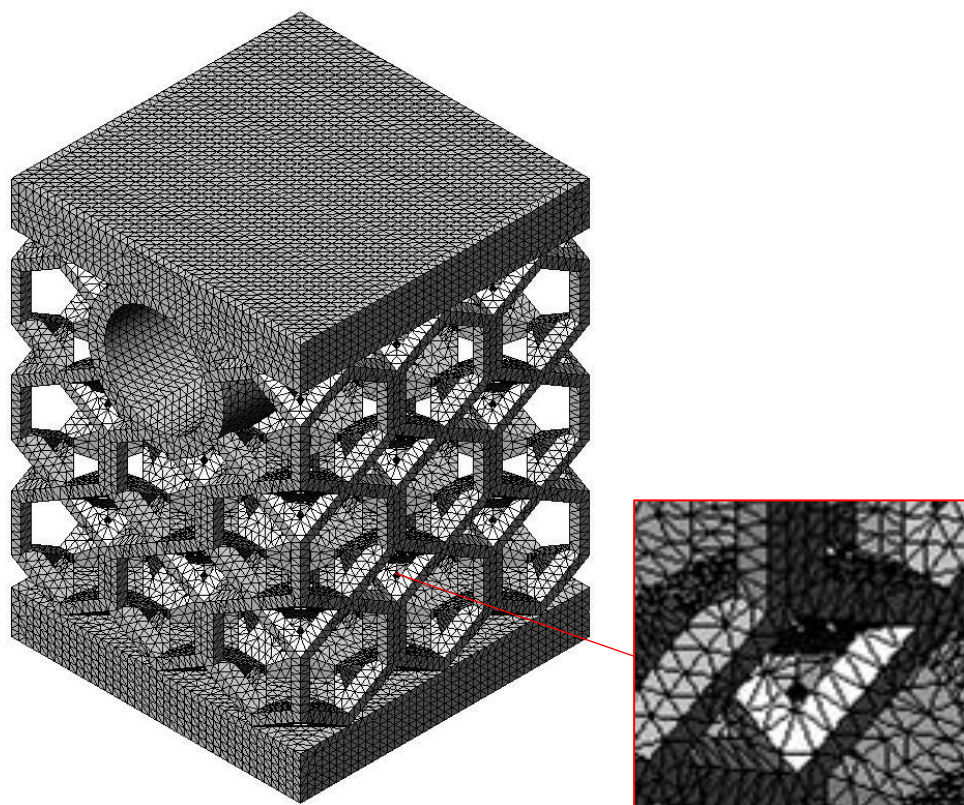


**Figura 5.6** – Detalhe da tensão máxima aplicada

### 5.3.2. Provete de face hexagonal

Para este tipo de geometria interna, a malha do provete foi construída como sendo de alta qualidade, possuindo um AR máximo de 15,054. Este valor pode-se considerar como alarmante, tendo em conta o já explicado anteriormente. No entanto, se analisarmos a percentagem de elementos com AR superior a 10, esse valor não chega a 1% dos elementos totais, tomando o valor de 0.0337. Verifica-se que 98,3 % dos elementos possuem um AR menor que 3. Este problema foi alvo de correção, no entanto conclui-se que só levaria a um tempo de construção de malha bastante superior e decidiu-se avançar com a presente malha. O tempo decorrido para a construção da malha foi 39 segundos.



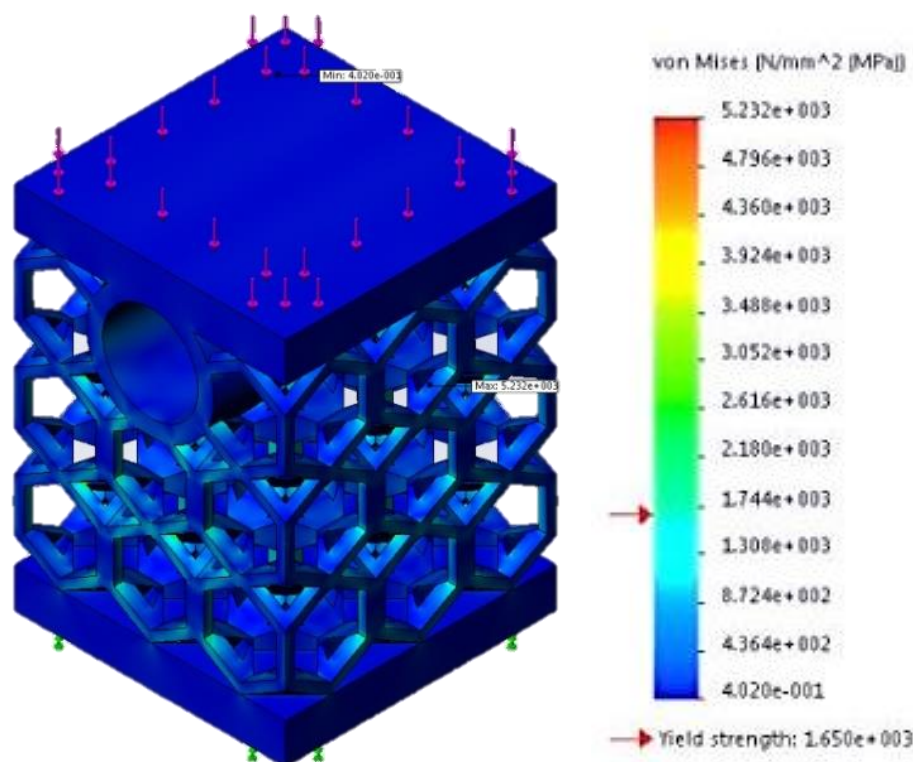


**Figura 5.7** - Malha obtida para o provete de face hexagonal

**Tabela 5.1** - Detalhes da malha do provete de face hexagonal

<b>Total Nodes</b>	412724
<b>Total Elements</b>	260884
<b>Maximum Aspect Ratio</b>	15.054
<b>% of elements with Aspect Ratio &lt; 3</b>	98.3
<b>% of elements with Aspect Ratio &gt; 10</b>	0.0337
<b>% of distorted elements(Jacobian)</b>	0
<b>Time to complete mesh(hh:mm:ss):</b>	00:00:39
<b>Computer name:</b>	C6-PROJ-M03

Repetindo as condições do estudo, mas desta vez para este tipo de geometria, são obtidos os resultados apresentados na Figura 5.8.



**Figura 5.8** – Tensões aplicadas durante o ensaio para o provete de face hexagonal

Os resultados encontrados para este ensaio também confirmam que para a carga aplicada de 10 kN, a tensão de rotura do material irá ser ultrapassada em algumas zonas do provete. A distribuição de tensões pelo provete é bastante similar à outra geometria testada, apresentando uma concentração de tensões pontual, ultrapassando a tensão de cedência do material e resultando na rotura do provete nesse ponto.

#### 5.4. Estudo de comportamento térmico

O estudo numérico de comportamento térmico foi efetuado com o intuito de fornecer uma base de resultados para servirem de comparação aos ensaios térmicos experimentais. A temperatura aplicada no canal de refrigeração do provete simula uma resistência de aquecimento que induz temperatura para a restante estrutura, sendo a mesma então a gama de temperaturas analisada de forma a se conseguir observar o comportamento térmico de ambas as estruturas. A temperatura ambiente e inicial do material foi considerada, bem como a posição do provete, de forma a replicar ao máximo o ensaio real efetuado.

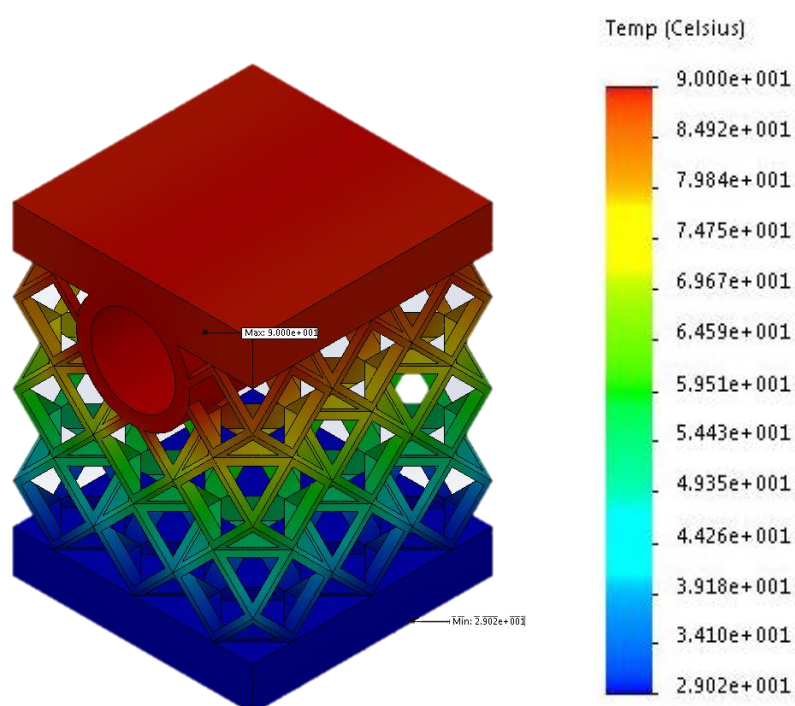
Tendo tudo isto em conta, o estudo foi realizado com a aplicação de uma temperatura estática distribuída no canal cilíndrico do provete com a opção “temperature”. Esta carga adotou o valor de 90 °C. O valor escolhido de temperatura teve em conta as dimensões do provete, sendo este de tamanho reduzido. A introdução de uma temperatura demasiado alta iria acelerar bastante a condução de calor, tornando bastante difícil a análise de dados. Para a temperatura ambiente foi adotado um valor médio de 25 °C.

Os valores de temperatura foram analisados com rigor no topo e base do provete, após decorrer de 15 segundos e uma segunda vez aos 45 segundos.

Ambos os ensaios, de cada uma das diferentes topologias internas, obedece aos parâmetros indicados acima. A criação da malha foi efetuada seguindo todas as indicações já descritas anteriormente.

#### 5.4.1. Provete cuboctaedro

A malha utilizada para o ensaio é a mesma descrita e verificada no estudo estrutural. Com a malha preparada e todo o processo indo de encontro ao explicado no subcapítulo anterior, foi possível analisar o comportamento térmico deste tipo de geometria interna.

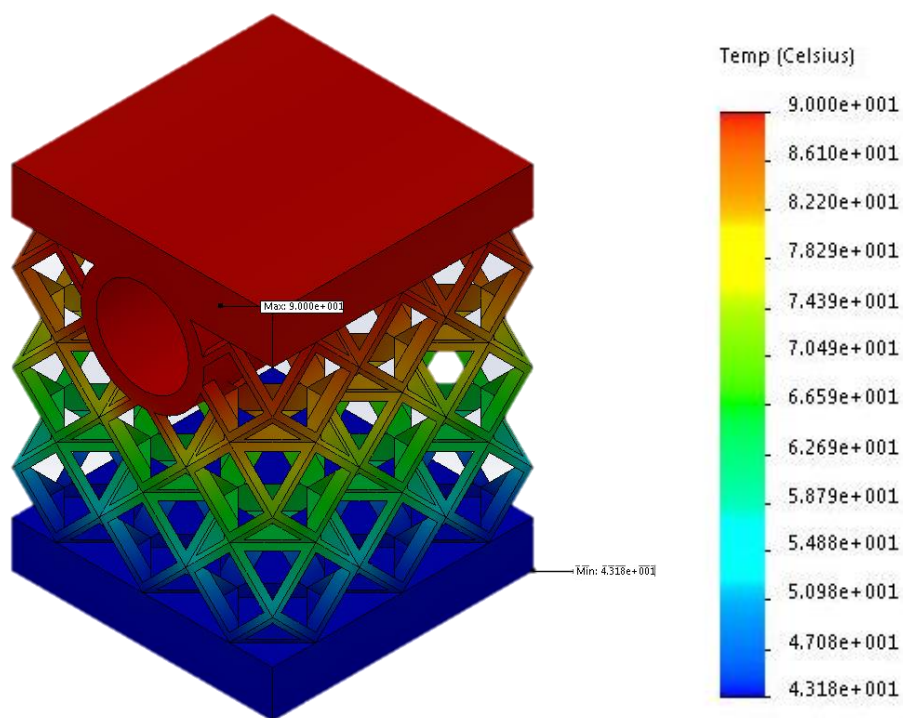


**Figura 5.9** – Distribuição temperatura no provete cuboctaedro passados 15s de estudo

Ao final de 15 segundos observou-se que a temperatura do topo do provete, representando a zona moldante, tinha atingido na sua totalidade a temperatura induzida pela resistência, 90 °C. Com esse mesmo tempo decorrido, a base do provete pouco aumentou a sua temperatura, possuindo um valor aproximado de 29 °C.

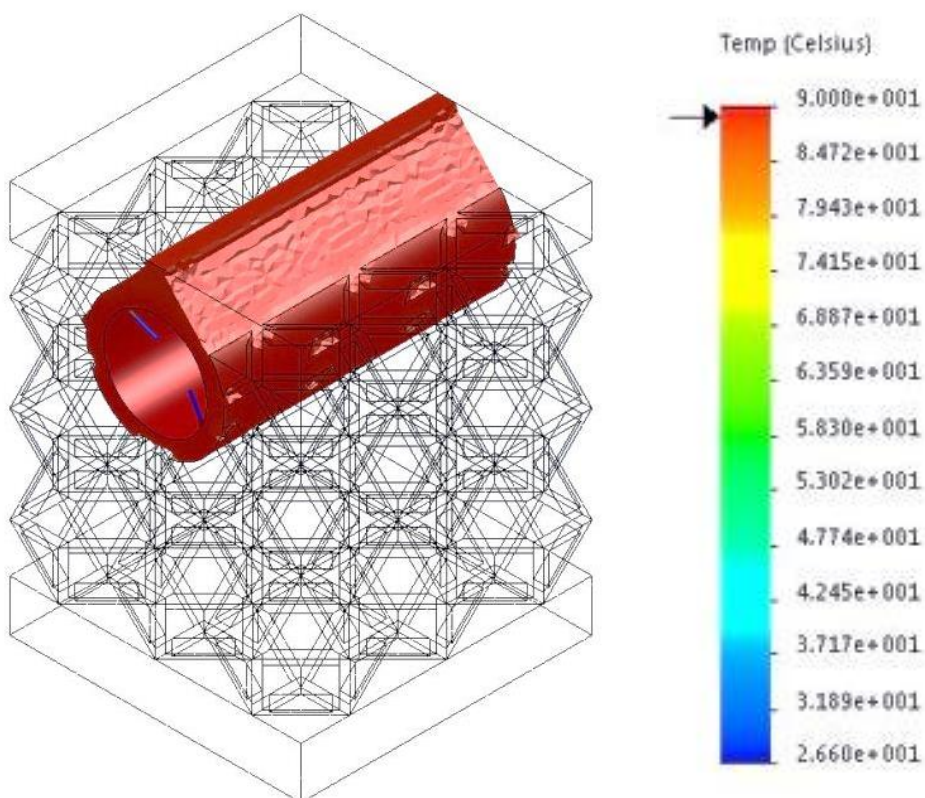
Fazendo este mesmo tipo de análise aos 45 segundos, o topo mantém a sua temperatura nos 90 °C, visto que não existe mais nenhuma entrada de fluxo de calor, superior aos 90 °C da resistência. A base do provete, tendo decorrido 45 segundos possui o valor de 43 °C.





**Figura 5.10** – Distribuição temperatura no provete cuboctaedro passados 45s de estudo

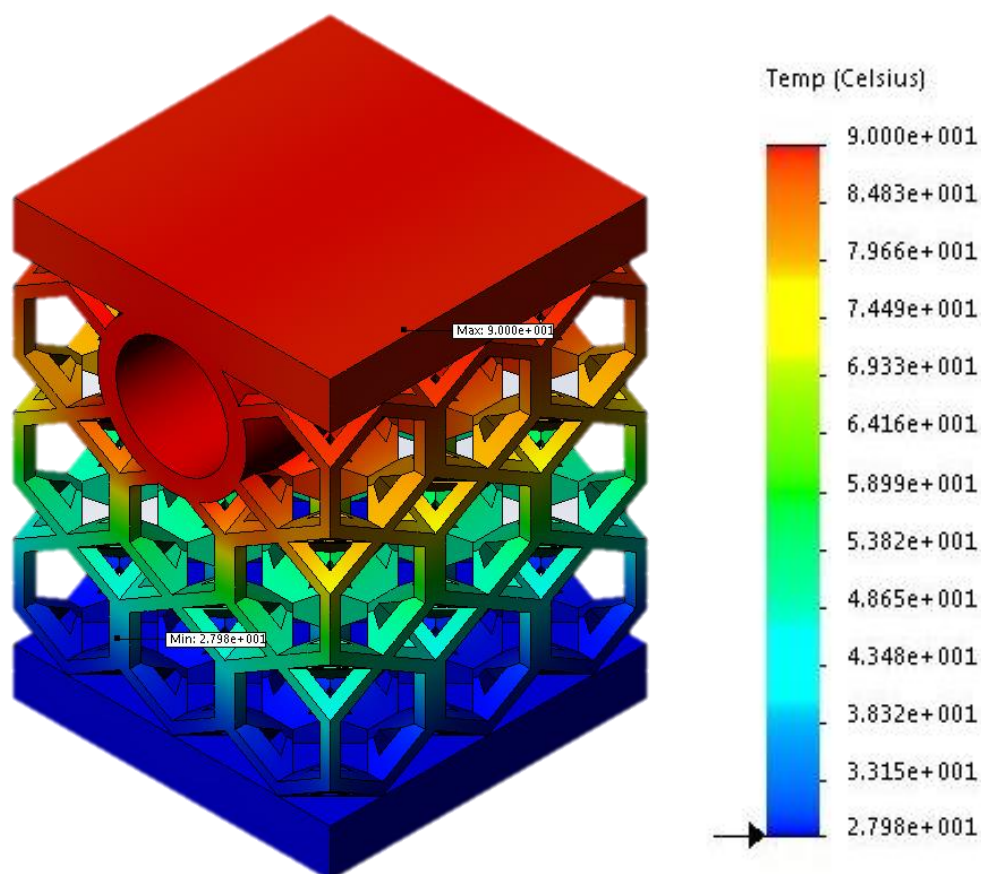
Foi ainda analisado o tempo que levaria à temperatura de 90 °C induzida pela resistência, a chegar ao topo. Esta ação decorre em 10,2 segundos para este tipo de geometria. Sendo que ao fim de esse mesmo tempo, a temperatura na base toma o valor de 26 °C.



**Figura 5.11** – Tempo em que o topo do provete cuboctaedro atinge a temperatura de 90°C

#### 5.4.2. Provete de face hexagonal

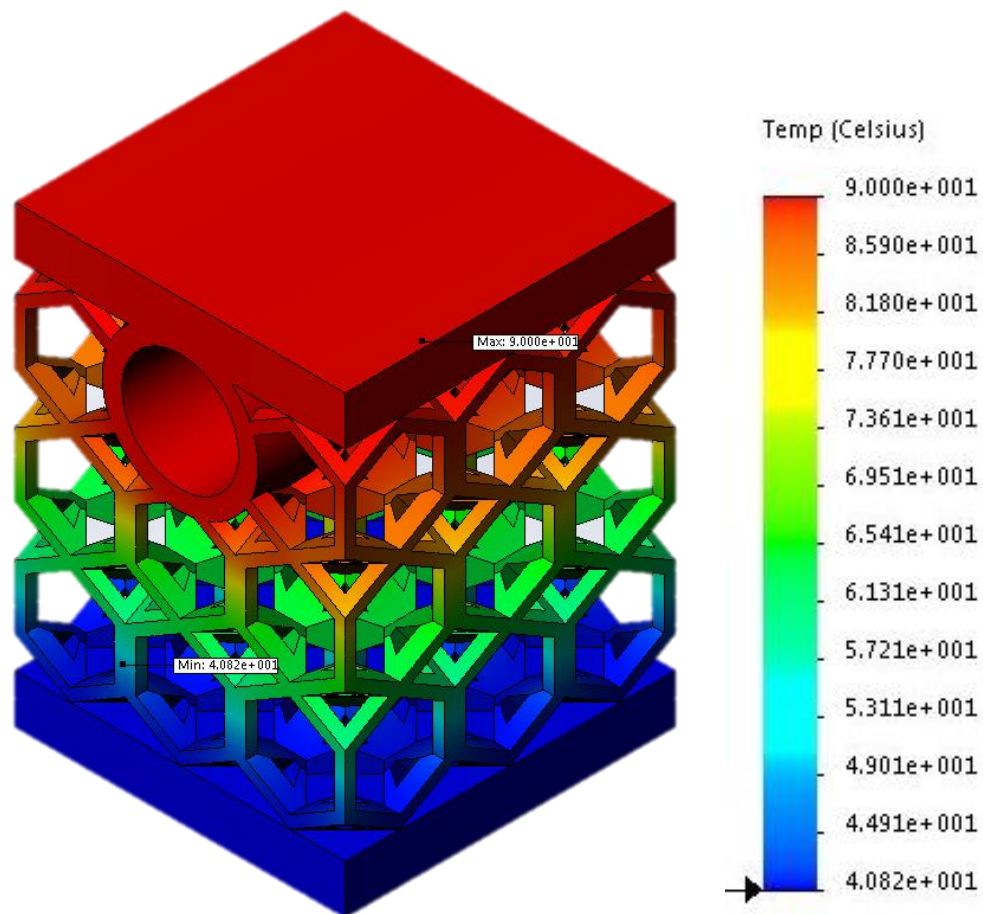
Repetindo o estudo anterior para este tipo de geometria interna, conseguiu-se analisar a mesma em relação ao seu comportamento térmico.



**Figura 5.12** – Distribuição temperatura no provete de face hexagonal passados 15s de estudo

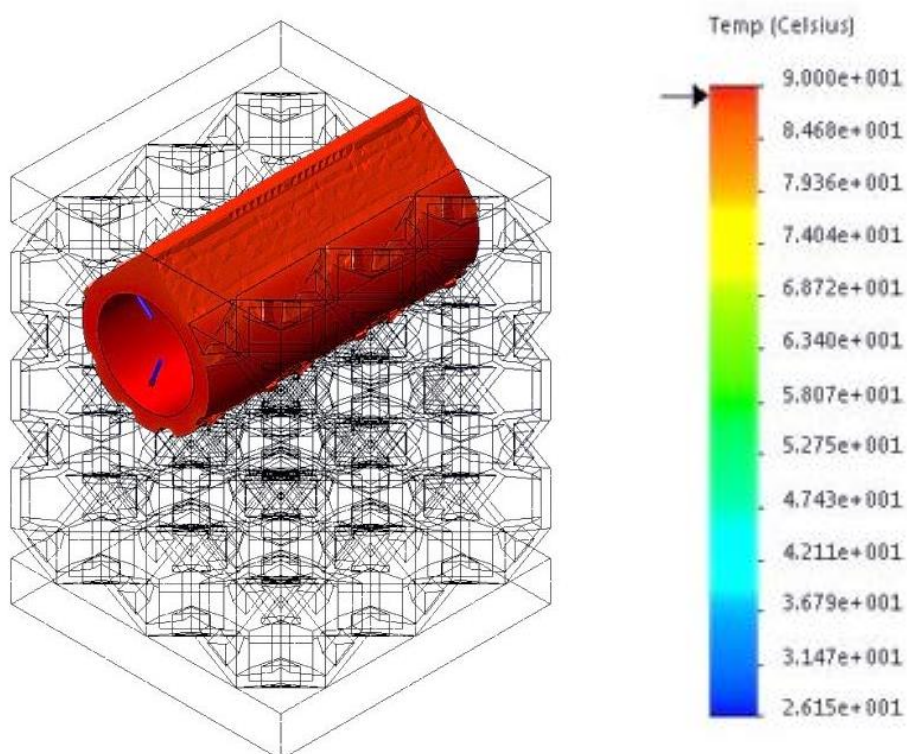
Ao final de 15 segundos observou-se que a temperatura do topo do provete, representando a zona moldante, tinha atingido na sua totalidade a temperatura induzida pela resistência, 90 °C. Com esse mesmo tempo decorrido, a base do provete pouco aumentou a sua temperatura, possuindo um valor aproximado de 28 °C.

Repetindo a análise aos 45 segundos, o topo mantém a sua temperatura nos 90 °C, visto que não existe mais nenhuma entrada de fluxo de calor, superior aos 90 °C da resistência. A base do provete, tendo decorrido 45 segundos possui o valor de 40 °C.



**Figura 5.13** – Distribuição temperatura no provete de face hexagonal passados 45s de estudo

Também para esta topologia interna, foi analisado o tempo que levaria à temperatura de 90 °C induzida pela resistência, a chegar ao topo. Esta ação decorre em 10,4 segundos para este tipo de geometria. Sendo que ao fim de esse mesmo tempo, a temperatura na base toma o valor aproximado de 26 °C.



**Figura 5.14** – Tempo em que o topo de provete de face hexagonal atinge a temperatura de 90°C.

Pode-se verificar então, que apesar de a diferença não ser abismal, o provete cuboctaedro apresenta um comportamento mais indicado para a aplicação pretendida, na medida que consegue transferir o calor para a zona moldante de uma forma mais rápida enquanto a sua temperatura na base se mantém mais baixa.



## 6. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Pretende-se com os ensaios experimentais, comparar resultados com os obtidos do estudo numérico, de forma a validar ou reforçar os mesmos. Para este efeito foi necessário produzir um conjunto de provetes para a realização dos ensaios de compressão e para o teste térmico.

### 6.1. Produção dos provetes

Para a produção dos provetes de teste, o CDRSP teve a gentileza de disponibilizar o equipamento SLM 125HL, da SLM Solutions GmbH. Este equipamento de fabrico aditivo de peças metálicas funciona através da tecnologia de SLM, permitindo a construção dos corpos de teste com as diferentes complexas topologias internas.

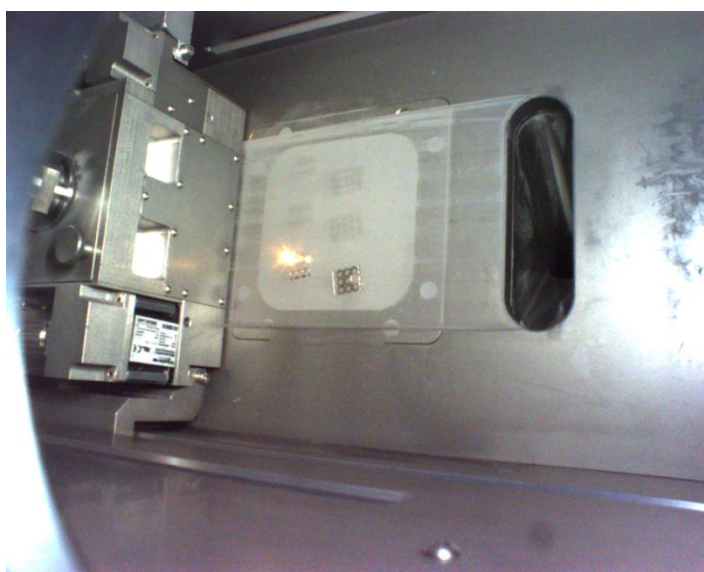


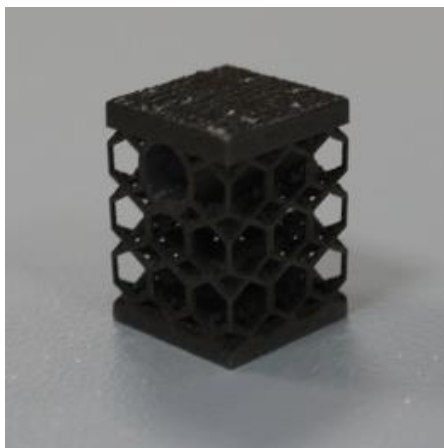
**Figura 6.1** – SLM 125 HL (CDRSP, 2014)

**Tabela 6.1** – Características técnicas do equipamento SLM 125HL

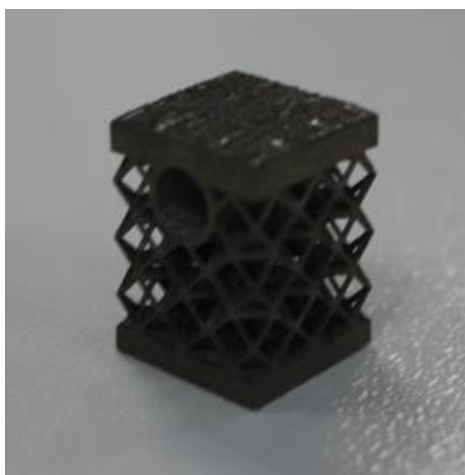
<b>Camara de construção (x/y/z)</b>	<b>125x125 x 75 (125) [mm]</b>
<b>Potência do laser</b>	100/200 W
<b>Velocidade de construção</b>	15 cm <sup>3</sup> /h
<b>Pract. Layer thickness</b>	20 µm - 75 µm
<b>Min. Scan Line / Wall Thickness</b>	140 -160 µm
<b>Operational Beam Fokus variable</b>	70 µm -130 µm
<b>Scan Speed</b>	20 m/s
<b>Consumo de gás inerte em funcionamento</b>	Ar/N2, 0,5 l/min
<b>Consumo de gás inerte ventilação</b>	Ar/N2, 1000 l @100/min.
<b>Necessidade de ar comprimido</b>	ISO 8573-1, 12,5 l/min. @ 1,5 bar
<b>Dimensões (B x H x D)</b>	1350 x 1900 (2400) x 800 [mm]
<b>Peso</b>	700 kg
<b>Consumo energético</b>	400 Volt 3NPE, 32 A, 50/60 Hz, 4 kW/h

Sendo esta uma tecnologia, que hoje em dia, ainda possui elevados custos associados à produção de peças, apenas foram produzidos três provetes para cada uma das topologias internas, totalizando 6 provetes de teste.

**Figura 6.2** – Produção dos provetes no equipamento



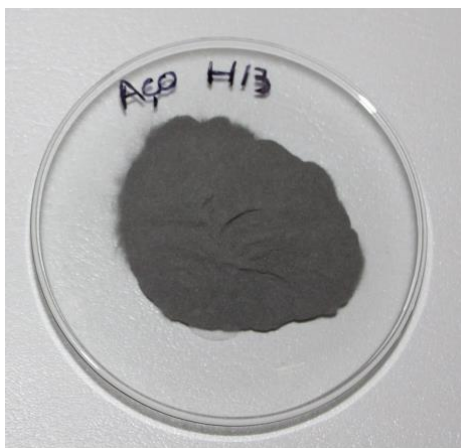
**Figura 6.3** – Provete de face hexagonal produzido através de SLM



**Figura 6.4** – Provete cuboctaedro produzido através de SLM

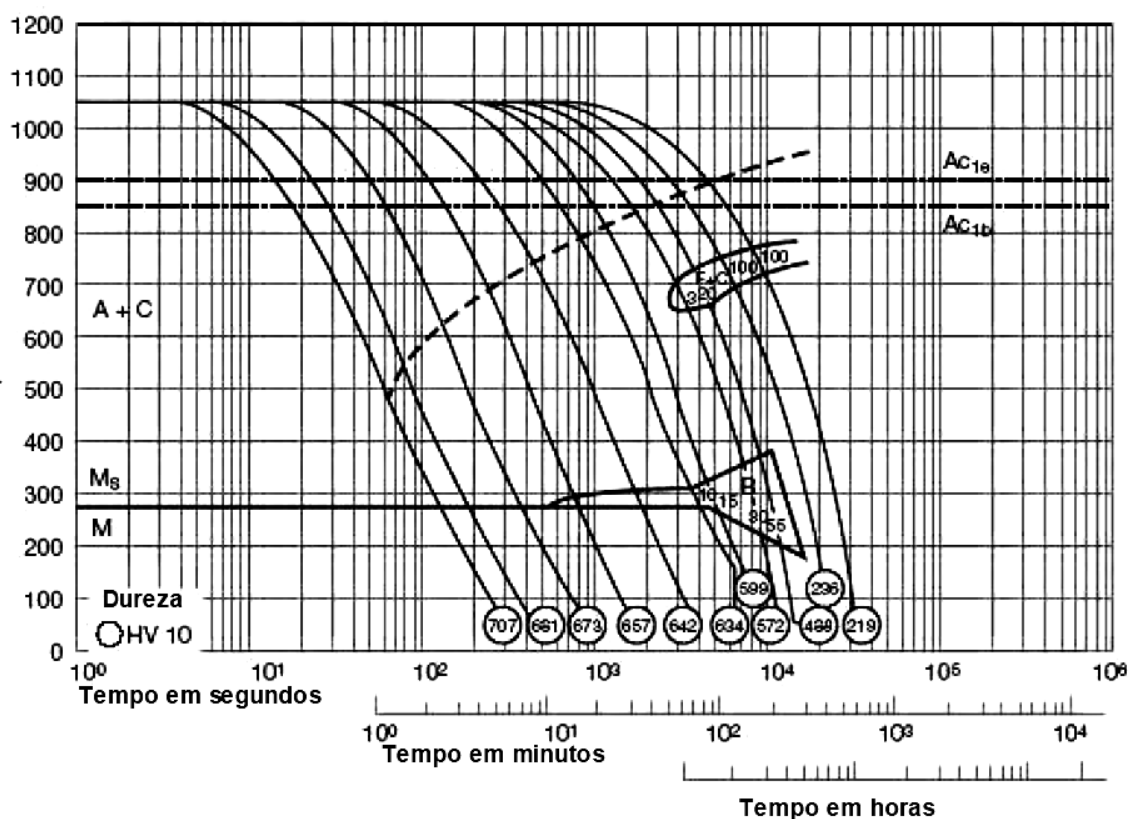
#### **6.1.1. Descrição do material utilizado**

Para a produção das peças foi escolhida a utilização de aço ferramenta H13, devido à sua grande utilização na indústria dos moldes. O aço ferramenta AISI H13 (DIN X40CrMoV5-1, UNS T20813, ASTM A681), Figura 6.5, apresenta elevada dureza, excelente resistência ao desgaste e tenacidade a quente. O H13 possui uma boa resistência ao choque térmico podendo dessa forma ser usado em aplicações que implicam refrigeração. É o aço mais vulgarmente utilizado na indústria de moldes para injeção de termoplásticos não clorados em que se requer boa resistência ao desgaste aliada com boa capacidade de polimento. Este aço ferramenta é ideal para trabalhar a quente, apresenta excelentes propriedades de tração a quente, grande resistência ao desgaste a quente, boa tenacidade e resistência a altas temperaturas.



**Figura 6.5** – Pó para processamento de aço H13 (CDRSP, 2014)

O aço ferramenta H13 é aplicado em trabalho a quente, como por exemplo moldes de fundição, ferramentas de extrusão, matrizes de forjamento, matrizes de estampagem a quente, moldes de plástico. Na Figura 6.6 é apresentado o diagrama temperatura-tempo-transformação do aço H13.



**Figura 6.6** – Diagrama temperatura-tempo-transformação do aço H13

As Tabelas 6.2, 6.3 e 6.4, apresentam as principais propriedades deste aço.



**Tabela 6.2 – Propriedades mecânicas do aço H13**

<b>Propriedades mecânicas</b>		
<b>Dureza, Rockwell</b>	28-54	(Dependendo do tratamento térmico)
<b>Tensão máxima</b>	1990	Mpa
<b>Tensão de limite elástico</b>	1650	Mpa
<b>Deformação máxima</b>	9	%
<b>Módulo de elasticidade</b>	210	Gpa
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,3	-
<b>Massa volúmica</b>	7,8	g/cm <sup>3</sup>

**Tabela 6.3 – Propriedade térmicas do aço H13**

<b>Propriedades térmicas</b>		
<b>Coefficiente de expansão térmica linear</b>	11	μm/m°C (T=25-95 °C)
	11,5	μm/m°C (T=25-205 °C)
	12,4	μm/m°C (T=25-540 °C)
<b>Calor específico</b>	0,46	J/g°C (T entre 0 e 100 °C)
<b>Condutividade térmica</b>	24,3	W/m K (T=215 °C)
	24,3	W/m K (T=475 °C)
	24,4	W/m K (T=350 °C)
	24,7	W/m K (T=605 °C)

**Tabela 6.4 – Composição química do aço H13**

<b>Composição química</b>	
<b>C</b>	0,32-0,40 %
<b>Cr</b>	5,13-5,25%
<b>Fe</b>	>91%
<b>Mo</b>	1,33-1,4%
<b>Si</b>	1,00%
<b>V</b>	1,00%

**6.1.2. Parâmetros de processamento**

Aqui encontram-se descritos os parâmetros de processamento do equipamento de SLM para a produção dos provetes de teste. Esta descrição vai de encontro ao explicado no subcapítulo 3.4.6 e divide-se em dois pontos, peça e suportes de construção. É importante referir que o autor não teve qualquer influência no processo produtivo da peça, nem nos parâmetros de construção, sendo o equipamento operado pelo operador responsável do mesmo, no CDRSP.

**Tabela 6.5 – Parâmetros de construção dos provetes de teste**

<b>Provete</b>					
<b>Etapas</b>	<b>Velocidade de exposição do laser [mm/s]</b>	<b>Output do laser [W]</b>	<b>Offset do foco do feixe de laser [mm]</b>	<b>Distância entre pontos [um]</b>	<b>Tempo de exposição [us]</b>
<b>Volume border</b>	450	95	1	1	1
<b>Volume area</b>	385	95	2	1	1
<b>Volume offset hatch</b>	400	95	1	1	1
<b>Suportes</b>					
-	665	95	1	1	1

## 6.2. Ensaios de compressão

Uma vez que a intenção é estudar se este tipo de estruturas, com diferentes topologias internas, são aplicáveis na estrutura de um molde, foi necessário criar um conjunto de provetes de forma a aplicar cargas típicas de injeção. Não existindo uma norma específica para este tipo de aplicações ou estruturas, os provetes construídos e testados não se apresentam conforme nenhuma norma. A norma que mais se aproxima deste tipo de estruturas é a ISO 13314 - “*Mechanical testing of metals ductility testing - Compression test for porous and cellular metals*”. No entanto, esta norma requeria que as dimensões de largura e altura do provete de teste fossem, pelo menos, dez vezes superior ao diâmetro de um poro. Essa condição conduziria a um provete de dimensões bastante elevadas, que se traduziria num custo bastante elevado e num tempo de construção bastante superior, tornando impossível a construção de mais do que um provete. Os ensaios foram realizados com os provetes colocados no centro do prato inferior, isto é, com os topos abertos orientados na vertical. A carga foi aplicada até ocorrer a rotura do provete, sendo então interrompido o teste nesse ponto.

Os valores da tensão máxima foram obtidos analiticamente através da Equação 2, sendo F a força de compressão aplicada expressa em N e A a área da secção transversal do provete, com o valor de 289 mm<sup>2</sup>.

$$\sigma_{max} = \frac{F}{A} \quad (2)$$

### 6.2.1. Descrição do equipamento



**Figura 6.7** – Instron 4505 (CDRSP, 2014)

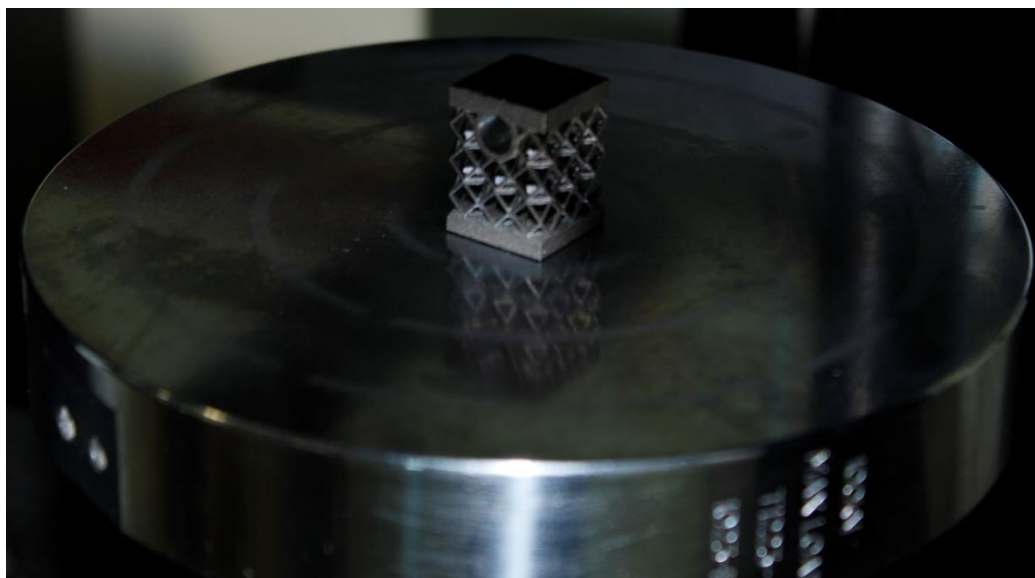
O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de compressão foi o Instron 4505, com uma célula de carga de 100 kN, como se pode observar na figura.

Para cada ensaio realizado foram registados os valores de carga aplicados e as respetivas deformações sofridas, utilizando o *software* auxiliar de aquisição de dados do equipamento.

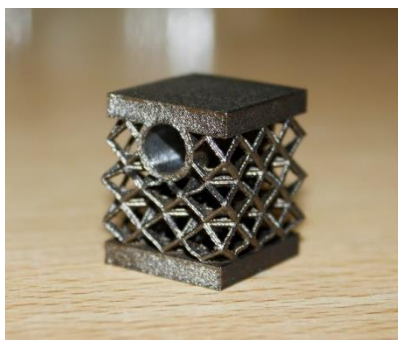
Os dados adquiridos sob a forma de ficheiro de texto, foram posteriormente analisados de forma a construir curvas características do comportamento mecânico de cada uma das topologias internas.

### 6.2.2. Provete cuboctaedro

Após a realização do estudo numérico, era expectável que, aplicada uma carga no valor de 10 kN, o provete fosse ruir como demonstrado anteriormente nas simulações computacionais. No entanto, os resultados experimentais foram sensivelmente superiores aos do estudo numérico, na medida em que ambos os provetes suportaram cargas superiores às testadas computacionalmente.

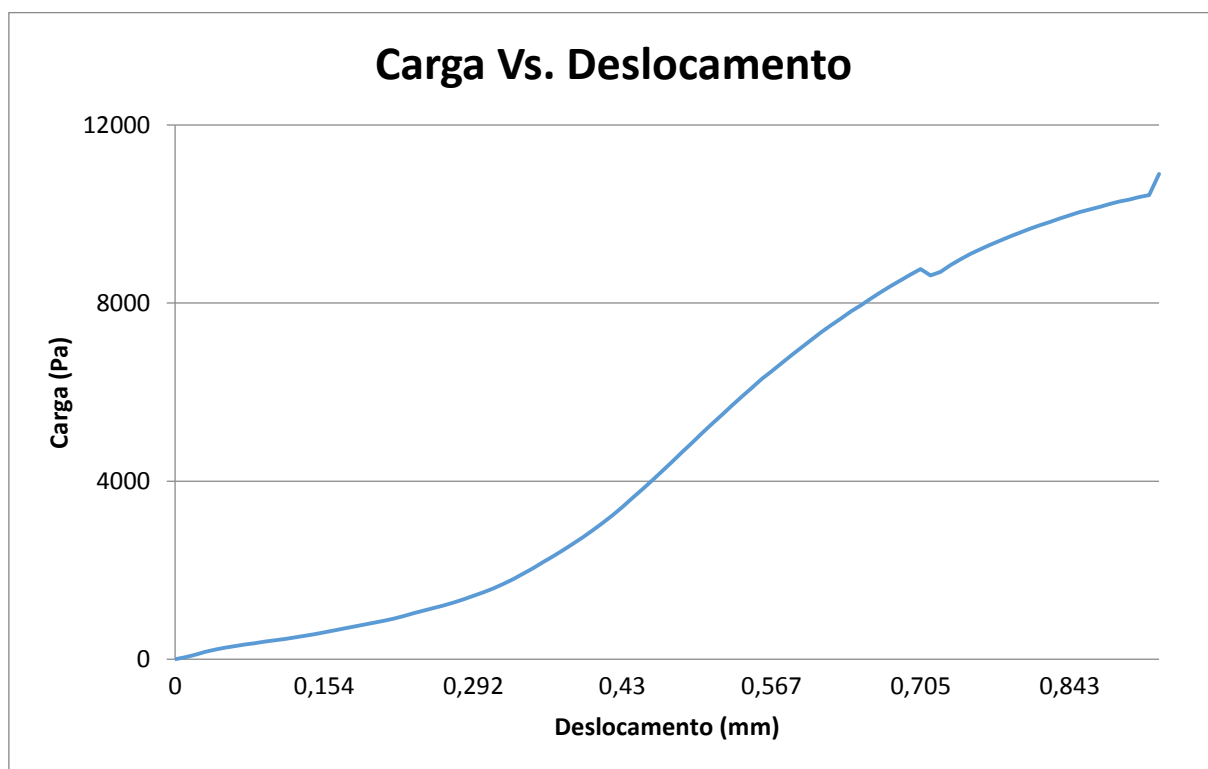
**Figura 6.8** – Preparação para o ensaio de compressão da geometria cuboctaédrica

Para o provete com geometria interna cuboctaédrica, após feitos os ensaios e calculada uma média através dos dados adquiridos para a carga máxima aplicada nos três provetes, o valor de carga máxima aplicada causando a rutura, foi de 10,9 kN. Este valor máximo traduz-se numa tensão máxima aproximada de 38 MPa, calculada através da Equação 2. Esta diferença, mesmo sendo de valor reduzido, demonstra que, na realidade, este tipo de estrutura possa ser mais resistente que o esperado.



**Figura 6.9** – Provete cuboctaédro após ensaio de compressão

Para os mesmos três provetes deste tipo de geometria, foi calculada a média do deslocamento máximo, obtendo-se o valor de 0,94 mm. Analisando o gráfico de Carga vs Deslocamento, apresentado na Figura 6.10, verificam-se os valores descritos. A tensão máxima de 38 MPa, apresenta-se como bastante positiva, tornando este tipo de estrutura interna aplicável em diversas estruturas de moldes de injeção.

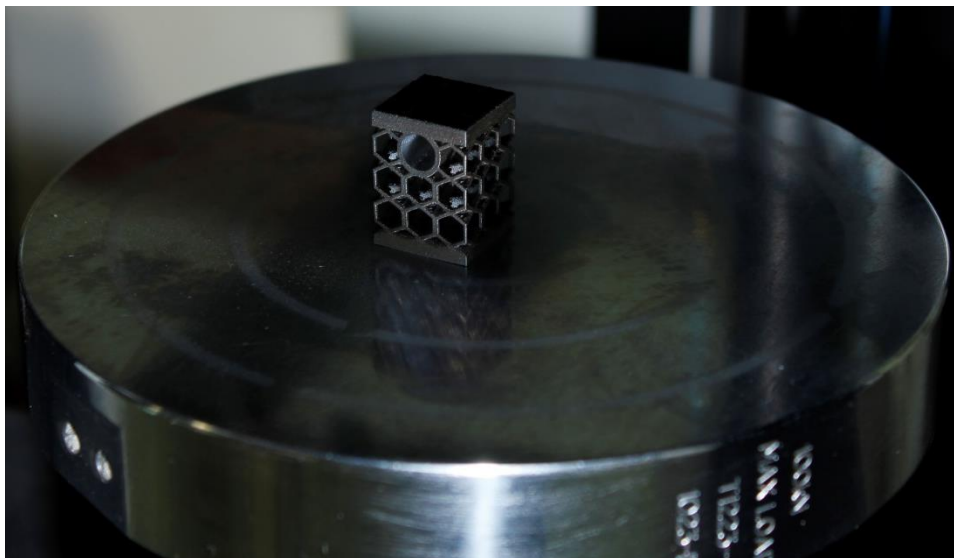


**Figura 6.10** – Curva Carga vs Deslocamento do provete cuboctaedro

### 6.2.3. Provete de face hexagonal

Tal como aconteceu com o provete de geometria interna cuboctaédrica, devido ao observado anteriormente no estudo numérico, era esperado que este provete, de geometria interna de face hexagonal, sofresse rutura com uma carga aplicada de 10 kN. No entanto, os resultados

experimentais provaram ser superiores em relação ao estudo numérico, como aconteceu com o outro tipo de geometria interna.



**Figura 6.11** - Preparação para o ensaio de compressão da geometria de face hexagonal

Para esta topologia interna, após efetuados os ensaios e recolhidos todos os dados com recurso ao *software* auxiliar do equipamento, foi calculada a média da carga máxima aplicada no provete. Desta forma, foi obtido um valor de carga máxima de 14,25 kN, sendo este o valor médio que causa a rutura deste tipo de tipologia interna. Através da Equação 2, obtém-se um valor de tensão máxima de 49,31 MPa.

Este valor é superior ao estudado e demonstra que este tipo de estrutura interna se apresenta como superior à geometria cuboctaédrica em aplicações sujeitas a cargas de compressão.

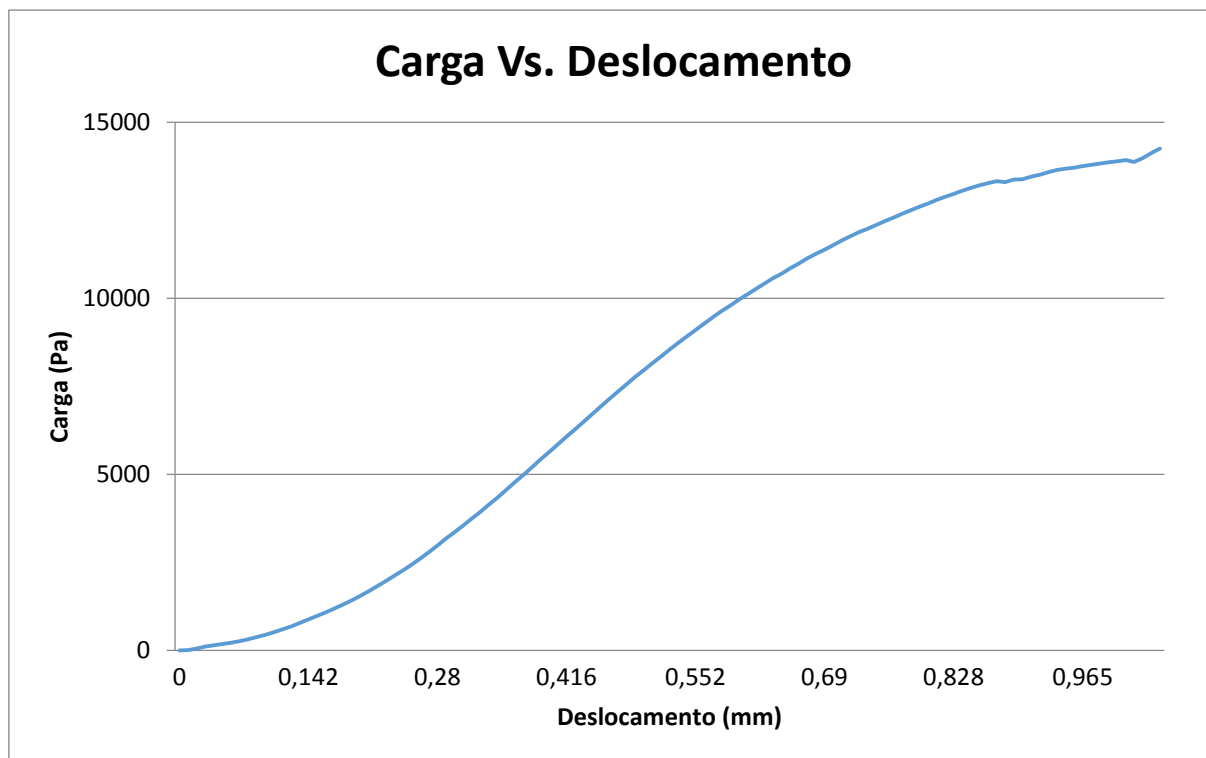


**Figura 6.12** – Provete de face hexagonal após ensaio de compressão

Para os mesmos ensaios, foi efetuada a média do deslocamento máximo para este tipo de geometria, obtendo-se o valor de 1,17 mm. Verifica-se que este tipo de geometria, em termos de resistência mecânica, apresenta valores superiores obtidos com o provete de topologia

interna cuboctaédrica, tornando assim possível a sua aplicação numa estrutura interna de moldes de injeção para variadas aplicações.

Os resultados podem ser confirmados analisando o gráfico Carga vs Deslocamento, representado na Figura 6.13.



**Figura 6.13** - Curva Carga vs Deslocamento do provete de face hexagonal

### 6.3. Ensaios térmicos

De forma a validar os resultados obtidos no estudo numérico, resolveu-se montar um sistema capaz de reproduzir o ensaio, tentando ao máximo replicar as condições aplicadas na simulação. No entanto, tratando-se de um ensaio térmico real, várias condições não controladas pelo utilizador, influenciaram a mudança de certos parâmetros. A temperatura do ar ambiente da sala não se manteve sempre constante, variando entre os 23 e os 25 °C nos diferentes ensaios. As condições iniciais da temperatura da resistência de aquecimento diferenciaram-se das da simulação na medida em que no estudo numérico a temperatura inicia-se a 90 °C fixando mantendo-se nesse valor, enquanto que, no ensaio real, a resistência inicia-se na temperatura ambiente e demora alguns segundos a atingir a temperatura fixa de 90 °C, sendo que esta temperatura continua a aumentar, pois o termopar não se encontra diretamente em contacto com a resistência, criando assim alguma diferença na captura do valor de temperatura da mesma.

Independentemente das considerações indicadas no parágrafo anterior, foi possível efetuar os testes e analisar qual das duas topologias internas apresenta uma melhor condução térmica.

### 6.3.1. Descrição do equipamento

**Tabela 6.6** – Características técnicas da câmara termográfica Flir T650sc.

<b>Qualidade de imagem térmica:</b>	<b>640x480 pixéis</b>
<b>Sensibilidade térmica:</b>	<20 mk @ +30°C
<b>Gama de temperatura:</b>	-40°C up to +2,000°C
<b>Frequência de imagem:</b>	30 Hz
<b>Gama de espectro:</b>	7.5 - 14 µm
<b>Interface:</b>	4.3" LCD touch screen, 800 x 480 pixeis
<b>Camara digital:</b>	5 megapixéis
<b>Portas externas:</b>	Digital Video (DVI), HDMI
<b>Outras funcionalidades:</b>	GPS Auto foco contínuo Armazenamento automático de imagem térmica e visual

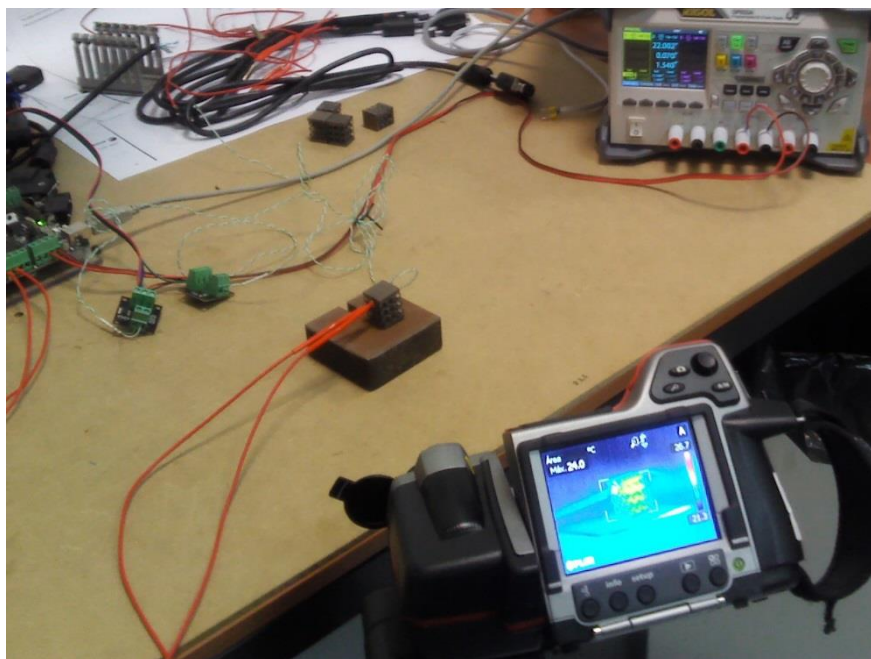
A análise foi efetuada com recurso a uma resistência de aquecimento, acompanhada de um termopar, ligada a uma placa de controlo na qual se podia definir a temperatura da mesma, sendo posteriormente registados os valores de temperatura ao longo do tempo com recurso a uma câmara termográfica da marca Flir, modelo T650sc.





**Figura 6.14** – Câmera termográfica Flir T650sc (CDRSP, 2014)

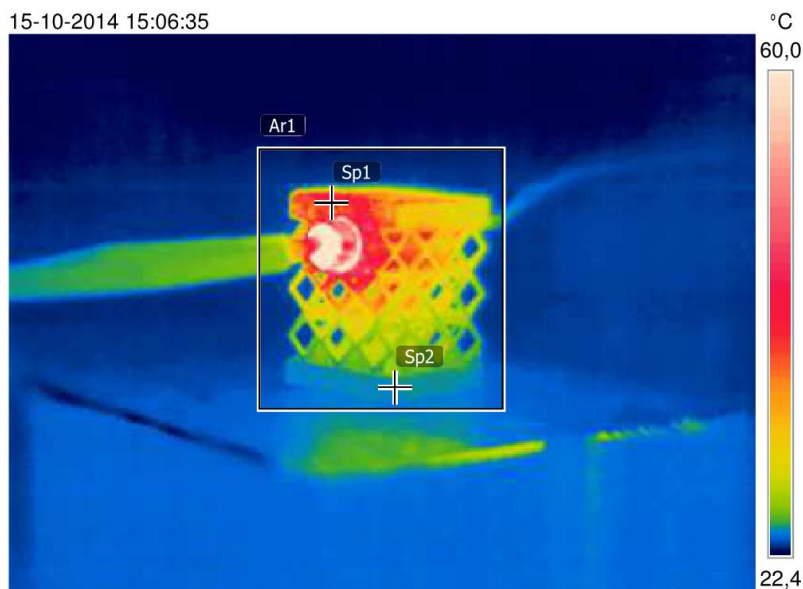
Foram captadas três imagens em cada ensaio, uma no estado inicial, outra após 15 segundos de ensaio e a final aos 45 segundos de ensaio. As imagens foram posteriormente tratadas e analisadas com recurso ao software Flir Tools, fornecido pela empresa da marca da máquina, de forma a poderem ser comparadas com os resultados do estudo numérico.



**Figura 6.15** – Ensaios térmicos (CDRSP, 2014)

### 6.3.2. Provete cuboctaedro

Tal como foi efetuado no estudo numérico, os valores foram retirados em duas etapas, uma passados 15 segundos do início do teste e outra passados 45 segundos.



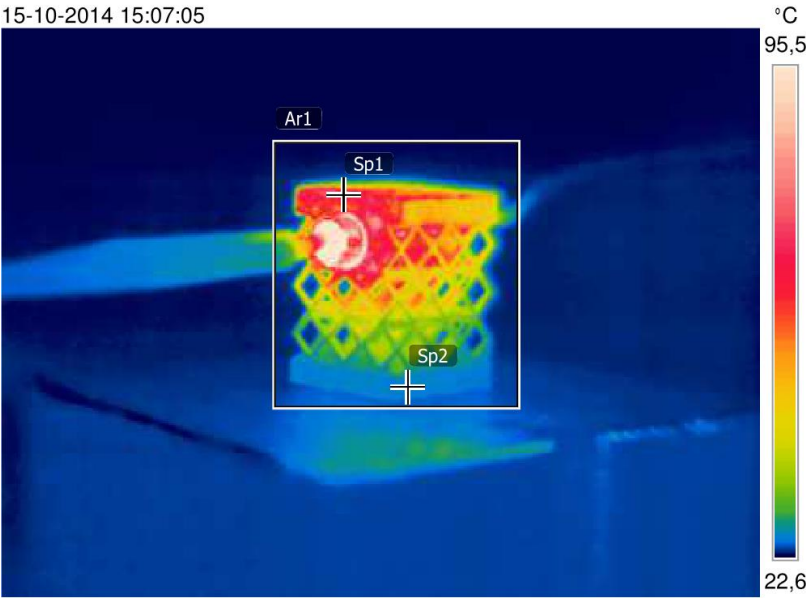
**Figura 6.16** – Provete cuboctaedro, 15 segundos de ensaio

Passados 15 segundos do início do ensaio, o topo do provete atingiu a temperatura de 39,9 °C, enquanto que, na base a temperatura se manteve perto da temperatura ambiente, com o valor de 24,7 °C.

**Tabela 6.7** – Valores de temperatura aos 15 segundos de ensaio do provete cuboctaedro

Medições		°C
Ar1	Max	96,9
Sp1		39,9
Sp2		24,7
Parâmetros		
Emissividade		0.98
Temp. refl.		23 °C

Aos 45 segundos de ensaio, o topo subiu a sua temperatura para os 74,4 °C e a base pouco subiu a sua temperatura, possuindo o valor de 26,6 °C, como se pode verificar na Figura 6.17 e se encontra descrito na Tabela 6.8.

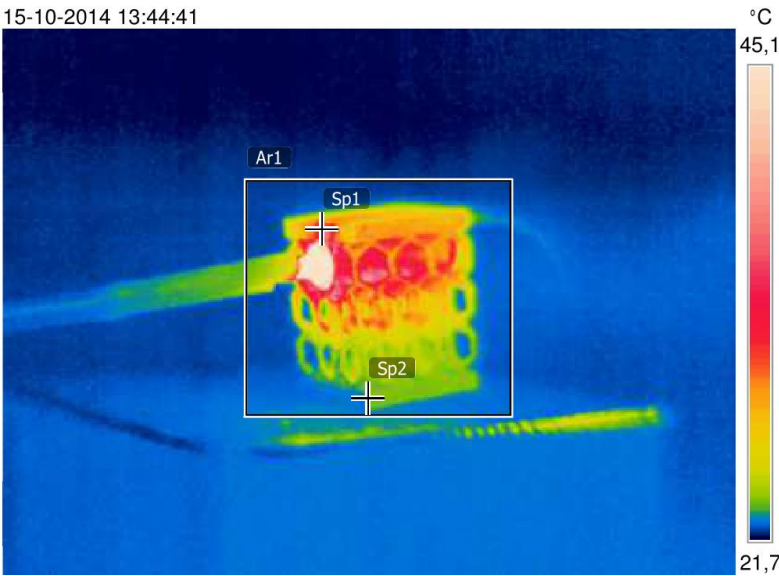


**Figura 6.17** – Provete cuboctaedro, 45 segundos de ensaio

**Tabela 6.8** - Valores de temperatura aos 45 segundos de ensaio do provete cuboctaedro

Medições		°C
Ar1	Max	149,7
Sp1		74,4
Sp2		26,6
Parâmetros		
Emissividade		0.98
Temp. refl.		23 °C

**6.3.3. Provete de face hexagonal**



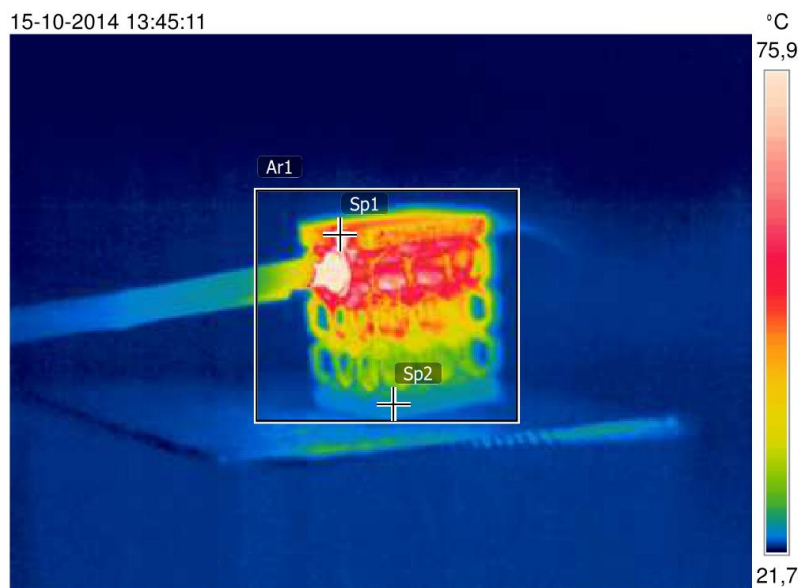
**Figura 6.18** – Provete de face hexagonal, 15 segundos de ensaio

O mesmo procedimento foi utilizado para avaliar a estrutura interna de face hexagonal. Para este provete, passados 15 segundos de teste, o topo do provete atingiu a temperatura de 37,7 °C, enquanto que na base a temperatura se manteve perto da temperatura ambiente, com o valor de 23,6 °C.

**Tabela 6.9** - Valores de temperatura aos 15 segundos de ensaio do provete de face hexagonal

Medições		°C
Ar1	Max	92,8
Sp1		37,7
Sp2		23,6
Parâmetros		
Emissividade		0.98
Temp. refl.		23 °C

Aos 45 segundos de ensaio voltaram-se a retirar valores, tendo o topo uma temperatura de 70,6 °C e a base 24,8 °C.



**Figura 6.19** – Provete de face hexagonal, 45 segundos de ensaio

**Tabela 6.10** - Valores de temperatura aos 45 segundos de ensaio do provete de face hexagonal

Medições		°C
Ar1	Max	148,5
Sp1		70,6
Sp2		24,8
Parâmetros		
Emissividade		0,98
Temp. refl.		23 °C

Comparando as duas geometrias, podemos observar que em ambas as etapas, 15 e 45 segundos, o provete cuboctaedro possui uma temperatura superior no topo que o provete de face hexagonal. Aos 15 segundos a temperatura no topo é de 39,9 °C e 37,7 °C, no provete cuboctaedro e no provete de face hexagonal, respetivamente. Aos 45 segundos a temperatura no topo do provete de face hexagonal é de 70,6 °C e 74,4 °C para o provete de geometria cuboctaédrica, demonstrando assim que a geometria cuboctaédrica se apresenta como melhor condutora de calor.

Desta forma, as conclusões retiradas com este ensaio vão de encontro ao já verificado no estudo numérico do comportamento térmico destas estruturas internas, confirmando que o provete cuboctaedro apresenta uma melhor condução de calor que o provete de face hexagonal.

## 7. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 7.1. Conclusões

De forma a obter resultados que permitissem a avaliação do comportamento mecânico e térmico das diferentes topologias internas apresentadas no presente projeto, foi utilizado um processo de fabrico aditivo com um enorme potencial no fabrico de peças metálicas, o processo de SLM. Recorrendo a este processo, mostrou-se ser possível construir objetos metálicos, em aço ferramenta H13, com uma estrutura interna bastante porosa, constituída por estruturas alveolares otimizadas. Dois tipos de geometria interna foram testados e construídos com êxito, uma geometria cuboctaédrica e uma geometria de face hexagonal. O móbil do presente projeto consistia em estudar estas estruturas termicamente. No entanto, de forma a validar a sua utilização em moldes de injeção de plástico, foi necessário avaliar o seu comportamento estrutural, ainda que de uma forma simplista.

Desta forma, como primeiro processo de avaliação, os provetes construídos com as diferentes topologias internas, foram estudados numericamente através de processos CAE. Estudando numericamente os provetes submetidos a uma carga de compressão na ordem dos 10 kN, foi possível verificar as tensões exercidas em toda a estrutura. Concluiu-se que a distribuição das tensões foi bastante similar em ambos os provetes, concentrando os seus valores máximos em pequenos pontos de ligação no interior de cada geometria, enquanto a restante estrutura sofre tensões bastante inferiores à tensão de rotura do material. No entanto, observa-se que a aplicação dessa mesma carga iria resultar na ruína de ambas as topologias internas.

Numa tentativa de validar este estudo numérico com recurso a ferramentas CAE, foram posteriormente efetuados ensaios experimentais de compressão a ambas as geometrias. Três provetes de cada uma das diferentes topologias internas foram submetidos a estes ensaios. Os ensaios foram realizados aplicando carga no provete até ao mesmo atingir a sua rutura, sendo então neste ponto interrompido o teste e retirado o respetivo valor de carga máxima. Os resultados obtidos nos ensaios experimentais foram bastante positivos, apresentando valores de carga máxima superiores ao estudo numérico. Ao contrário do estudo numérico, ambas as geometrias não ruíram com a aplicação de 10 kN, sendo que o provete cuboctaedro sofreu uma carga máxima de 10,9 kN e o provete de face hexagonal 14,25 kN. Conclui-se que ambas as geometrias são viáveis para aplicação em certas estruturas de moldes, sendo a topologia interna de face hexagonal, bastante superior, a nível estrutural, à topologia interna cuboctaédrica.

Indo então de encontro ao ponto principal deste estudo, foi necessário também analisar o comportamento térmico de ambas as topologias internas. Também esta análise foi efetuada de duas formas distintas. Numa primeira etapa foi feito um estudo numérico com recurso a ferramentas CAE, efetuando depois, numa segunda fase, ensaios experimentais de forma a encontrar valores capazes de serem comparáveis com os do estudo numérico. Visto que o objetivo seria aplicar este tipo de estruturas nas zonas moldantes de um molde, era importante que o calor aplicado nas mesmas fosse rapidamente conduzido para o topo enquanto o

fenómeno contrário se passasse relativamente à base, de forma a otimizar os ciclos de arrefecimento e aquecimento rápido dessa mesma zona.

O estudo numérico de comportamento térmico foi efetuado, aplicando uma carga térmica no provete e analisando como o mesmo conduzia o calor para o seu topo e base. Avaliando este processo nos dois provetes com as distintas geometrias internas, verificou-se que ambos os provetes se apresentaram como bons condutores de calor para o topo e restringiram a condução de calor para a base. No entanto, ainda que por pouca diferença, o provete cuboctaedro mostrou ser a melhor estrutura do ponto de vista térmico, conseguindo atingir a temperatura de 90 °C no topo mais rapidamente que a estrutura de face hexagonal. Na segunda etapa desta avaliação de comportamento térmico, numa tentativa de obter valores comparáveis com os do estudo numérico, um estudo térmico experimental foi efetuado, com recurso a uma resistência de aquecimento conectada a uma placa de controlo. Os provetes foram sujeitos a uma carga térmica ao longo do tempo, induzida pela resistência, sendo analisados depois com recurso a uma câmara termográfica, aos 15 e 45 segundos de teste. Avaliando este processo nos dois provetes com as distintas geometrias internas, observou-se o já verificado pelo estudo numérico. Ambos os provetes se apresentam como melhores condutores de calor para o topo (zona moldante), do que para a base. Para além disso, também se confirmou que o provete cuboctaedro possuía um comportamento térmico superior ao provete de face hexagonal, ainda que seja por diferença pequena.

Com os estudos numéricos e ensaios experimentais concluídos, chegou-se a uma situação caricata, na medida em que a estrutura cuboctaédrica possui um comportamento térmico superior ao provete de face hexagonal, enquanto que no comportamento mecânico o provete de face hexagonal possui vantagem. No entanto, conclui-se que ambas as geometrias podem ser utilizadas na construção de moldes, otimizando a estrutura para o fim que se pretende.

Analisando por final os custos de produção, ambos os provetes utilizam uma quantidade de material semelhante que, quando comparada com a produção de uma estrutura maciça com as mesmas dimensões, conduz a uma redução de cerca de 57% do custo total do material.

## 7.2. Trabalhos futuros

Com a realização deste trabalho foi possível estudar e contabilizar algumas propriedades destas estruturas internas e perceber que este tipo de tecnologia pode ser aplicada no futuro. No entanto, de forma a avançar nesta área, é necessário o estudo de alguns pontos-chave que deveriam ser alvo de trabalhos futuros, nomeadamente:

- Variar as topologias internas na tentativa de encontrar o melhor desempenho possível, para uma determinada solicitação mecânica e/ou térmica;
- Verificar se diferentes direções de construção influenciam as características das estruturas;
- Otimizar os parâmetros de produção para obter superfícies de melhor qualidade;
- Variar as porosidades internas dos provetes de forma a otimizar as topologias internas para diferentes aplicações;

- Produzir provetes normalizados, com recurso a SLM, para os testes estruturais e térmicos;
- Efetuar ensaios de flexão e tração às estruturas, de forma a avaliar profundamente as suas características mecânicas;
- Melhorar o processo de ensaios térmicos experimentais, de forma a eliminar perturbações exteriores;
- Produzir um molde de teste com uma topologia interna otimizada;
- Produzir peças através do molde de teste com o objetivo de retirar resultados experimentais;
- Efetuar ensaios de fadiga às estruturas fabricadas e comparar com as estruturas maciças utilizadas convencionalmente.



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biamino, S. et al., 2011. Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation. *Intermetallics*, 19, pp.776–781.
- Burkhart, T. a, Andrews, D.M. & Dunning, C.E., 2013. Finite element modeling mesh quality, energy balance and validation methods: a review with recommendations associated with the modeling of bone tissue. *Journal of biomechanics*, 46(9), pp.1477–88. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23623312> [Accessed August 11, 2014].
- Carreira, P., 2013. *Otimização de injeção sobre tecidos pré-impregnados*. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- Chua, C.K., Leong, K.F. & Lim, C.S., 2010. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, Available at: <http://www.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=4OYcyiDUpsQC&pgis=1> [Accessed November 3, 2014].
- Cooper, K., 2001. *Rapid prototyping technology: selection and application*, Available at: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=H50qMZFN4JEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Rapid+Prototyping+Technology+Selection+and+Application&ots=Lsa2K0x9h0&sig=tO3cnIIOho-zC94t70CWvuTLyHQ> [Accessed September 11, 2014].
- Dadbakhsh, S. et al., 2012. Experimental investigation on selective laser melting behaviour and processing windows of in situ reacted Al/Fe 2O<sub>3</sub> powder mixture. *Powder Technology*, 231, pp.112–121.
- Fellipa, C., 2012. No Title. In *FEM modeling: Mesh, Loads and BCs*. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0> [Accessed October 28, 2014].
- Fox, P. et al., 2008. Interface interactions between porous titanium/tantalum coatings, produced by Selective Laser Melting (SLM), on a cobalt-chromium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 202, pp.5001–5007.
- Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B., 2010. *Additive Manufacturing Technologies*, New York: Springer. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0> [Accessed September 11, 2014].

- Grenda, E., 2006. *Printing the Future: The 3D Printing and Rapid Prototyping Source Book*, Castle Island Company. Available at: <http://books.google.com/books?id=FTeLNAAACAAJ&pgis=1> [Accessed November 3, 2014].
- Gu, D. et al., 2014. Selective Laser Melting Additive Manufacturing of TiC/AlSi10Mg Bulk-form Nanocomposites with Tailored Microstructures and Properties. *Physics Procedia*, 56, pp.108–116. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389214002983> [Accessed October 27, 2014].
- Gümrük, R. & Mines, R. a. W., 2013. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 68, pp.125–139. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740313000118> [Accessed October 18, 2014].
- Hänninen, J., 2001. DMLS moves from rapid tooling to rapid manufacturing. *Metal Powder Report*, 56, pp.24–29.
- Hedberg, Y.S. et al., 2014. In vitro biocompatibility of CoCrMo dental alloys fabricated by selective laser melting. *Dental Materials*, 30, pp.525–534.
- Hong, S. et al., 2006. Quasi-static crush behavior of aluminum honeycomb specimens under compression dominant combined loads. *International Journal of Plasticity*, 22(1), pp.73–109. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0749641905000446> [Accessed October 20, 2014].
- Jamshidinia, M. et al., 2014. The bio-compatible dental implant designed by using non-stochastic porosity produced by Electron Beam Melting® (EBM). *Journal of Materials Processing Technology*, 214(8), pp.1728–1739. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013614000740> [Accessed October 27, 2014].
- Jia, Q. & Gu, D., 2014. Selective laser melting additive manufactured Inconel 718 superalloy parts: High-temperature oxidation property and its mechanisms. *Optics and Laser Technology*, 62, pp.161–171.
- JOO, B.D. et al., 2009. Selective laser melting of Fe-Ni-Cr layer on AISI H13 tool steel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 19, pp.921–924.

- Karunakaran, K.P. et al., 2013. Rapid manufacturing of metallic objects.  
Available at:  
<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552541211231644>  
[Accessed November 3, 2014].
- Kazmer, D., 2007. *Injection Mold Design Engineering*, Hansen.
- Khaing, M.W., Fuh, J.Y.H. & Lu, L., 2001. Direct metal laser sintering for rapid tooling: Processing and characterisation of EOS parts. In *Journal of Materials Processing Technology*. pp. 269–272.
- Knupp, P.M., 2007. Remarks on Mesh Quality. , pp.7–10.
- Li, P. et al., 2014. Deformation behaviour of stainless steel microlattice structures by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 614, pp.116–121. Available at:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509314008806> [Accessed October 18, 2014].
- Li, R. et al., 2010. Densification behavior of gas and water atomized 316L stainless steel powder during selective laser melting. *Applied Surface Science*, 256, pp.4350–4356.
- Liebschner, a. M. a. K., 2009. Mechano-biology as an optimization principle for biological tissue engineering. *Virtual and Physical Prototyping*, 4(4), pp.183–193. Available at:  
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452750903438684>  
[Accessed October 20, 2014].
- Liulan, L. et al., 2007. Design and Fabrication of Bone Tissue Engineering Scaffolds via Rapid Prototyping and CAD. *Journal of Rare Earths*, 25, pp.379–383.
- Löber, L. et al., 2014. Selective laser melting of a beta-solidifying Ti-Ni-Mo titanium aluminide alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, pp.1852–1860.
- Louvis, E., Fox, P. & Sutcliffe, C.J., 2011. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, pp.275–284.
- Mayer, S., 2005. Optimised mould temperature control procedure using DMLS. *EOS Whitepaper, EOS GmbH Ltd*, pp.1–11. Available at:  
[http://www.compositesworld.com/uploadedFiles/Publications/MMS/Articles/Internal/EOS\\_WP\\_DMLS2\\_ENG\\_12.pdf](http://www.compositesworld.com/uploadedFiles/Publications/MMS/Articles/Internal/EOS_WP_DMLS2_ENG_12.pdf) [Accessed September 11, 2014].

- McKown, S. et al., 2008. The quasi-static and blast loading response of lattice structures. *International Journal of Impact Engineering*, 35(8), pp.795–810. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X07001376> [Accessed October 18, 2014].
- Mechanics, S. & Safdar, A., 2010. *Microstructures and surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V* School of Technology Malmö University,
- Mohr, D. & Doyoyo, M., 2003. Nucleation and propagation of plastic collapse bands in aluminum honeycomb. *Journal of Applied Physics*, 94, pp.2262–2270.
- Nelson, J.C. et al., 1993. Model of the selective laser sintering of bisphenol-A polycarbonate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 32, pp.2305–2317.
- Pan, Y. et al., 2012. Smooth surface fabrication in mask projection based stereolithography. *Journal of Manufacturing Processes*, 14(4), pp.460–470. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.09.003>.
- Park, H. & Dang, X., 2005. Design and Simulation-Based Optimization of Cooling Channels for Plastic Injection Mold.
- Prashanth, K.G. et al., 2014. Friction welding of Al-12Si parts produced by selective laser melting. *Materials and Design*, 57, pp.632–637.
- Quenneville, C.E. & Dunning, C.E., 2011. Development of a finite element model of the tibia for short-duration high-force axial impact loading. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 14(2), pp.205–12. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21337226> [Accessed October 28, 2014].
- Ray, M.H. et al., 2008. National Cooperative Highway Research Program ( NCHRP ) Project 22-24 Recommended Procedures for Verification and Validation of Computer Simulations used for Roadside Safety Applications INTERIM REPORT. , (October).
- Riemer, A. et al., 2014. On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. *Engineering Fracture Mechanics*, 120, pp.15–25.
- Safdar, A. et al., 2012. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V. *Rapid Prototyping Journal*, 18, pp.401–408.

- Saifullah, A.B.M., Masood, S.H. & Sbarski, I., 2009. New Cooling Channel Design for Injection Moulding. , I, pp.3–6.
- Santos, E.C. et al., 2006. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, pp.1459–1468.
- Shellabear, M. & Weilhammer, J., 2007. Tooling applications with EOSINT M. *EOS Whitepaper, Krailling*. Available at: [http://www.3dimpuls.com/sites/default/files/download/tooling\\_applications\\_with\\_eosint\\_m280.pdf](http://www.3dimpuls.com/sites/default/files/download/tooling_applications_with_eosint_m280.pdf) [Accessed November 6, 2014].
- Shen, Y.K. et al., 2008. Analysis for optimal gate design of thin-walled injection molding. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, pp.728–734.
- Shoemaker, J., 2006. *Moldflow Design Guide* First Edit., Moldflow Corporation.
- Simchi, a, Petzoldt, F. & Pohl, H., 2003. On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 141(3), pp.319–328. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013603002838> [Accessed September 18, 2014].
- Solidworks, 2011. 2011 SOLIDWORKS Help - Meshing Tips. Available at: [http://help.solidworks.com/2011/English/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Meshing\\_topics/IDH\\_Whatsnew40\\_Recommended\\_Meshing\\_Strategy.html](http://help.solidworks.com/2011/English/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Meshing_topics/IDH_Whatsnew40_Recommended_Meshing_Strategy.html) [Accessed November 6, 2014].
- Sun, J., Yang, Y. & Wang, D., 2013. Mechanical properties of a Ti6Al4V porous structure produced by selective laser melting. *Materials and Design*, 49, pp.545–552.
- Thijs, L. et al., 2013. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia*, 61, pp.1809–1819.
- Tsukerman, I. & Plaks, a., 1998. Comparison of accuracy criteria for approximation of conservative fields on tetrahedra. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34(5), pp.3252–3255. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=717763>.
- Turker, M., Godlinski, D. & Petzoldt, F., 2008. Effect of production parameters on the properties of IN 718 superalloy by three-dimensional printing. *Materials Characterization*, 59, pp.1728–1735.

- Utela, B. et al., 2008. A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP). *Journal of Manufacturing Processes*, 10, pp.96–104.
- Volpato, N., 2007. *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*, Edgard Blücher. Available at: <http://books.google.com/books?id=p990PgAACAAJ&pgis=1> [Accessed November 3, 2014].
- Vrancken, B. et al., 2014. Microstructure and mechanical properties of a novel  $\beta$  titanium metallic composite by selective laser melting. *Acta Materialia*, 68, pp.150–158. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645414000275>.
- Wan Abdul Rahman, W.A., Sin, L.T. & Rahmat, A.R., 2008. Injection moulding simulation analysis of natural fiber composite window frame. *Journal of Materials Processing Technology*, 197, pp.22–30.
- Wierzbicki, T., 1983. Crushing analysis of metal honeycombs. *International Journal of Impact Engineering*, 1, pp.157–174.
- Wohlers, T.T., 2014. *Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates. Available at: <http://books.google.com/books?id=iCamoAEACAAJ&pgis=1> [Accessed November 3, 2014].
- Wu, E. & Jiang, W.-S., 1997. Axial crush of metallic honeycombs. *International Journal of Impact Engineering*, 19, pp.439–456.
- Yadroitsev, I. et al., 2010. Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, pp.1624–1631.
- Yasa, E. et al., 2010. Charpy impact testing of metallic selective laser melting parts. *Virtual and Physical Prototyping*, 5, pp.89–98.
- Zhou, Q. & Mayer, R.R., 2002. Characterization of Aluminum Honeycomb Material Failure in Large Deformation Compression, Shear, and Tearing. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 124, p.412.
- Ziolkowski, G. et al., 2014. Application of X-ray CT method for discontinuity and porosity detection in 316L stainless steel parts produced with SLM technology. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*.

Zonder, L. & Sella, N., 2013. *The role of 3D printed molds in the injection molding industry*,